



**SELÇUK  
ÜNİVERSİTESİ**

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

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

**EISSN 2147-9364**

**HAKEMLİ DERGİDİR**

OWNER/SAHİBİ

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

Chief Editor/Sef Editör

**Assoc. Prof. Dr. Murat YAKAR**

Editors/Editörler

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

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof. Dr. Cengiz ALYILMAZ, Ataturk University  
Prof. Dr. Ercan AKSOY, Bitlis Eren University  
Prof. Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University  
Prof. Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University  
Prof. Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Prof. Dr. Dervis KARABOGA, Erciyes University  
Prof. Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University  
Prof. Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University  
Prof. Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University  
Prof. Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

**Prof. Dr. Ali BERKTAY**

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

**Dr. Lutfiye Karasaka**  
**Res. Assist. Ismail KOC**

Correspondance Address/Yazışma Adresi

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

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

## **Editorial Board (Yayın Kurulu)**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Selcuk University, TURKEY  
Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA  
Ashok K. Mishra, Clemson University, USA  
Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY  
Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA  
Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN  
Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE  
Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY  
Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA  
Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN  
Ihsan Ozkan, Selcuk University, TURKEY  
John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA  
Kerim Kocak, Selcuk University, TURKEY  
Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA  
Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA  
Mohd Arif Wani, California State University, USA  
Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN  
Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN  
Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA  
Selim Dogan, Selcuk University, TURKEY  
Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA  
Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN  
Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA  
Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY  
Alpaslan Yazar, Selcuk University, TURKEY  
Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA  
Cihan Varol Sam Houston State University, USA  
Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA  
Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC  
Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM  
Halil Kursad Ersoy, Selcuk University, TURKEY  
Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA  
Huseyin Devenci, Selcuk University, TURKEY  
Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA  
Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN  
Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA  
Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS  
Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT  
Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA  
Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA  
Saadettin Erhan Kesen, Selcuk University, TURKEY  
Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY  
Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC  
Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN  
Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND  
Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

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

ISSN 2147 – 9364 (Elektronik)

Cilt	4	Aralık	2016	Sayı	4
Volume	4	December	2016	Number	4

**İÇİNDEKİLER (CONTENTS)**

**Araştırma Makalesi (Research Article)**

**ARK AKIMI VE ARK GERİLİMİNİN BAĞLANTI MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Arc Current and Arc Voltage of Inert-Gas Welding Parameters, Research The Effect on Tensile Test  
..... **Ahmet AKIN, Ali Serhat ERSOYOĞLU 237-255**

**METAL TABAKALI KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI ENİNE DARBEYE KARŞI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Investigation of Low Velocity Transverse Impact Behavior of Metal Laminated Composites  
..... **Memduh KARA, Mesut UYANER 256-270**

**ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOFİBER TABAKALI HAVA FİLTRESİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Production and Characterization of Air Filters with Nanofiber Layers Via Electro-Spinning Method  
..... **Kevser DİNCER, Gürol ÖNAL, Ahmet AKDEMİR, Mehmet SELBES 271-283**

**SOLUTION TO A PIPELINE SCHEDULING PROBLEM BY USING A MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL**

Solution to a Pipeline Scheduling Problem by Using a Mixed Integer Linear Programming Model  
..... **Mehmet Emin BAYSAL, Esra UÇAKTÜRK (English) 284-296**

**DRUG BIT CUTTING TRACE IMAGE COLOURS AND CUTTING FORCE FLUCTUATION RELATION**

Drug Bit Cutting Trace Image Colours and Cutting Force Fluctuation Relation  
..... **Mehmet Kemal GÖKAY, Arif Emre DURSUN (English) 297-308**



**ANALYSIS OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS IN ANTALYA PROVINCE (TURKEY) USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS**

Analysis of Road Traffic Accidents in Antalya Province (Turkey) Using Geographical Information Systems

..... Ela ERTUNÇ, Tayfun ÇAY, Ömer MUTLUOĞLU (English) 309-320

**INVESTIGATION OF SPATIAL ACCURACY OF HIGH-RESOLUTION (50cm) WORLDVIEW-2 SATALLITE IMAGES**

Investigation of Spatial Accuracy of High-Resolution (50cm) Worldview-2 Satallite Images

..... Ömer MUTLUOĞLU, Murat YAKAR, Hacı Murat YILMAZ (English) 321-329

**MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RECYCLED TIRES IN CONCRETE**

Mechanical Characterization of Recycled Tires in Concrete

..... Mehmet Alpaslan KÖROĞLU (English) 330-336

**PERÇİNLİ ÇELİK KÖPRÜ ELEMANLARININ YORULMA ÖMRÜ TESPİTİ ÇALIŞMALARI**

Identification of Revited Steel Bridges' Fatigue Life

..... Barlas Özden ÇAĞLAYAN, Hudai KAYA 337-355

**POLAR REPRESENTATION OF COMPLEX OCTONIONS**

Polar Representation of Complex Octonions

..... Mehdi JAFARİ (English) 356-364

## ARK AKIMI VE ARK GERİLİMİNİN BAĞLANTI MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Ahmet AKIN, <sup>2</sup>Ali Serhat ERSOYOĞLU

<sup>1,2</sup> Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü  
42079 Alaeddin Keykubad Kampüsü, KONYA

<sup>1</sup>ahmetakin1963@gmail.com, <sup>2</sup>aersoy@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 30.04.2015; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.07.2015)

**ÖZ:** Bu çalışmada gazaltı kaynak parametrelerinden ark akımı ve ark gerilimi dışında kalan parametreler sabit tutularak, çeşitli kaynak bağlantıları elde edilmiştir. Çalışmanın ana hedefi, sanayide özellikle imalat sektöründe sıklıkla kullanılan elle gazaltı kaynak yöntemi için, ark akımı ve ark geriliminin bağlantının çekme mukavemeti üzerindeki etkisini görmektir. Bu bağlantılarda ana malzeme olarak, mobil vinç imalatında sıkça kullanılan S700MC kalite malzeme seçilmiştir. Elde edilen bağlantıların, kaynak dikiş profilleri ve kaynak nüfuziyetleri incelendikten sonra, çekme mukavemetinin tespit edilmesi amacıyla, bağlantılardan çekme numuneleri çıkartılıp, çekme deneyleri uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda en çarpıcı sonuç, özellikle yüksek kaynak gerilimleri ile elde edilen bağlantılarda, yüksek gerilim sonucu oluşan uzun ark boyunda meydana gelmiştir. Uzun ark boyu nedeniyle kaynak dikişinin genişliği artmış ve nüfuziyeti azalmıştır. Ayrıca geniş dikiş profili sonucu hızlı soğuma meydana gelmiş ve iç gerilmeler artmıştır. Bu nedenlerin doğal sonucu olarak da uzun ark boyu ile elde edilen çekme mukavemet değerleri, kısa ve orta ark boyuna oranla yaklaşık %15 daha düşük sonuçlar vermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gazaltı kaynak, Gazaltı kaynak parametreleri, Kaynak akımı, Kaynak gerilimi, Çekme deneyi

### Arc Current and Arc Voltage of Inert-Gas Welding Parameters, Research The Effect on Tensile Test

**ABSTRACT:** In this work, various welding connections was obtained while pegging parameters from the inert-gas welding not included as welding current and welding voltage. Project main purpose is, to see the effect of arc voltage and the arc current tensile loading on the connections that manual inert-gas welding what especially using in manufacturing sector in industry. For the connections S700MC material choosen as main material that quiet using for mobile crane manufacturing. After examined the results obtained as welding seam geometry and dilution, to establish the tensile loading, tensile loading samples taken off from the connections and tested. Remarkable results after tension test is seemed especially long arc lenght consequent of high voltage on the connections obtained high welding tension. Because of the long arc lenght dilution decreased and welding seam wideness increased . Additonally rapid cooling consist and internal stress increased obtained of the wideness seam geometry. As a natural consequence of these reasons, tensile loading that obtained with long arc lenght values %15 less then the small and medium arc lengts.

**Key Words:** Welding, Welding parameters, Welding current, Welding voltage, Tensile test

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çeliklerin mekanik özelliklerinden bahsettiğimizde malzeme üzerine gelebilecek çekme, basma ve kesme gerilmelerini karşılayabilme özelliği, sertliği, sünekliği, kırılabilirliği, yorulmaya dayanımı gibi özellikler anlaşılır. Bir çeliğin sanayide imalat sektöründe kullanılabilmesi için mekanik özelliklerinin iyi olması kadar, işlenebilirliğinin ve kaynak kabiliyetinin de yüksek olması gerekir. Günümüzün sanayi senaryosunda yüksek kalitede kaynaklı bağlantılar elde edebilmek için iyi bir kaynaklama esastır. Bir kaynak bağlantısının kalitesi temel olarak kaynak türüne, kaynak parametrelerine, kaynak metalinin ve ısı tesiri altındaki bölgenin mekanik özelliklerine ve kimyasal bileşenlerine bağlıdır (Nuraini ve diğ., 2014).

Tersane, Otomotiv Sanayi, Makine İmalat Sanayi, gibi imalat sektörlerinde sacların birleştirilmesi için çeşitli kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Kaynak, işlemin cinsine göre 2 tip olarak sınıflandırılabilir (Aslanlar, 2009).

- Basınç Kaynağı,
- Eritme Kaynağı.

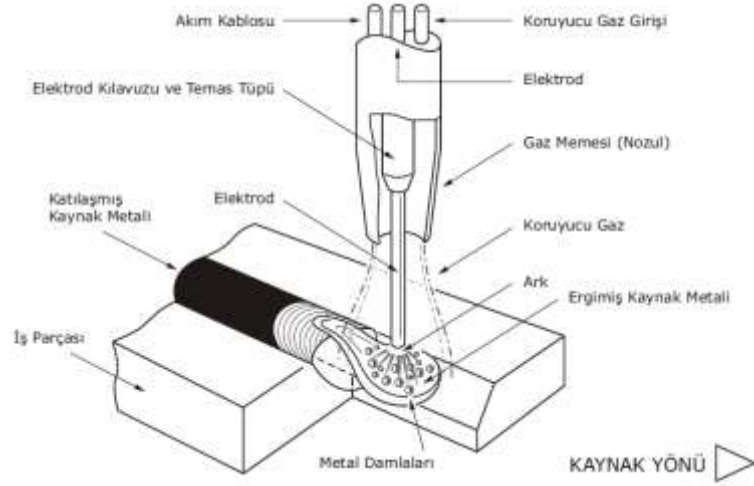
Eritme Kaynağı gurubunda yer alan örtülü elektrodla ark kaynağı, ilk kaynak yöntemi olması ve basit kaynak ekipmanları ile tatbik edilebilmesi nedeniyle uzunca bir süre kullanılmıştır. Ancak daha sonra örtülü elektrod kullanılarak el ile yapılan ark kaynağının, güvenilir bir bağlantı için kaynakçının belirli bir düzeyde yetiştirilmiş olması ve kaynak hızının sınırlı olması gibi maliyetli ve olumsuz özelliklerinden dolayı yarı-otomatik bir yöntem olan ve yine eritme kaynağı gurubunda yer alan gazaltı kaynağı tercih edilmeye başlanmıştır (Tülbentçi, 1990). Gazaltı kaynağı, yüksek güvenilirlik, tüm pozisyonlarda uygulanabilme, kolay kullanım, düşük maliyet, yüksek üretilebilirlik gibi avantajlara sahiptir (Shoeb ve diğ., 2013). Bu kaynak yöntemindeki mantık, çıplak elektrod telini mekanik bir tertibat yardımıyla sürekli olarak ilerletip, akımı, ark bölgesine çok yakın bir yerden vererek telin karşılayabileceği akım şiddetini artırıp erime gücünü yükseltmektir. Burada örtülü elektrod ile yapılan elektrik ark kaynağındaki örtünün görevini koruyucu gaz üstlenmiştir.

Gazaltı kaynağı için dezavantaj olabilecek durum ise açık havada kaynak işlemi tatbik edilirken oluşabilecek rüzgar gibi hava akımlarıdır. Bu hava akımları koruyucu gazın etkisini azaltıp, kaynağın kalitesini düşürür ve kaynak işlemini zorlaştırır. Bu durumda koruyucu gaz debisini artırmak geçici bir çözüm olabilir ancak artan gaz debisi ile hem kaynak kalitesi olumsuz etkilenebilir, hem de üretim maliyeti artmış olur (Hooda ve diğ., 2012).

Kul A. (2009), çalışmasında endüstriyel kaynak robotlarında kullanılan kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine ve nüfuziyetine etkisini araştırmıştır. Bu inceleme ile kaynak akım değerinin değişimini sağlayan asıl faktörün tel sürme hızı olduğunu görmüştür. Kaynak hızının değiştirilmesinin ise uygulanan kaynak akımına etkisinin olmadığını gözlemlemiştir. Ayrıca Kul A. bu çalışmasında, tel besleme hızının artmasıyla kaynak akımının ve kaynak banyosu sıcaklığının da arttığını tespit etmiştir. Bu da gereğinden fazla erime durumlarına ve hatta ana metalin delinip (kalınlığa bağlı olarak) kök taşması denilen kaynak akması olayının gerçekleştiği sonucuna ulaşmıştır. Tel besleme hızının azalmasıyla da, azalan akım miktarı sonucu kaynak banyosuna yeterli ısı geçişi olmamasını ve bu nedenle erime azlığından dolayı nüfuziyet problemlerinin olduğunu bulmuştur.

Bu çalışmada mobil vinç sektöründe çokça kullanılan S700MC kalite malzeme için MIG-MAG gazaltı kaynak yöntemleri ile bağlantılar elde edilmiş ve bu bağlantılar için nüfuziyetler ve dikiş profilleri incelenerek, çekme deneyi ile mukavemet testlerine tabi tutulmuşlardır. Koruyucu gaz olarak da, MIG-MAG uygulamalarında sıkça kullanılan karışım bir gaz olan %82Argon+%18CO2 karışımları kullanılmıştır. Bu koruyucu gazın kullanılmasının nedeni ise Argonun havadan 1.4 kat daha ağır bir gaz olması sebebiyle kaynak banyosunu örtme konusunda daha etkin bir başarı elde edebilmektedir. Ayrıca Argon gazının ısıl iletkenliğinin diğerlerine oranla düşük olması nedeniyle dikiş profili merkezinde nüfuziyet diğer gazlara oranla daha yüksektir. Argon gazına CO2 ilave edilmesinin amacı ise ark kararlılığını arttırmak ve yanal nüfuziyeti artırmaktır.

Bu çalışmada ele alınan MIG-MAG gazaltı kaynağıdır ve Şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 1. Gazaltı kaynağının prensibi

Figure 1. Principles of welding

#### MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Güvenilir kaynak bağlantısı elde edebilmek için ayarlanması gereken kaynak parametrelerinin başında ark akımı ve ark gerilimi gelir.

Gazaltı kaynak işlemlerinde ark gerilimi ve ark boyu genellikle birbiri yerine kullanılan terimlerdir. Her ne kadar bunların arasında bir ilişki olsa da tamamen aynı şeyler demek yanlış bir ifade olur. Ark boyu bağımsız bir değişkendir. Ark gerilimi ise hem ark boyuna, hem de birçok değişkene bağlıdır. Bunlar; elektrodun bileşimi ve çapı, koruyucu gazın cinsi, kaynak tekniği ve kaynak kablosunun uzunluğudur. Bu değişkenler sabit tutulursa, ark boyu doğrudan ark gerilimine bağlı olur.

Elektrod ucu ile temas tüpü arasındaki mesafe olan serbest elektrod uzunluğu, kaynak işleminin gerçekleşmesini sağlayan direnci oluşturur. Gazaltı kaynak makinelerinde, serbest elektrod uzunluğu, tel sürme hızı ile ayarlanır. Serbest elektrod uzunluğunun artması elektrik direncinde artmaya neden olur. Dolayısıyla, sabit gerilim karakteristiğine sahip gazaltı kaynak makinelerinde, kaynak akımının şiddeti, tel sürme hızının artırılıp, azaltılmasıyla ayarlanır. Bu sebeple kaynak işleminin düzgün bir şekilde yapılabilmesi için gerilim ve akım parametreleri, birlikte değerlendirilmelidir.

Kaynakçı ilk ayarları yaptıktan sonra elektriksel özellikler kaynak boyunca makine tarafından otomatik olarak sabit tutulur. Bu nedenle yarı otomatik kaynakta, kaynak işlemi sırasında sadece, kaynak hızı, kaynak doğrultusu ve torcun pozisyonu kaynakçı tarafından belirlenir. (Anık, 1972).

Kaynak dikişinin geometrisini ark akımı, ark gerilimi ve kaynak hızı gibi parametreler değiştirebilir (Essential Factors., 2011). Gazaltı kaynak parametrelerinin, bağlantının mukavemetine etkilerinin saptanması için deneysel planın oluşturulmasında, gazaltı kaynak parametrelerinden ark akımı ve ark gerilimi üzerinde yapılacak değişiklikler, ark türünü ve yığılma miktarını etkileyeceğinden, deneylerimizde kullanmayı hedeflediğimiz gerilim ve akım değerleri gruplar halinde incelenecektir. Yukarıda bahsettiğimiz gibi gerilim değerlerindeki değişiklik aynı zamanda ark boyunu etkilediğinden, gerilimler arasındaki farkı daha belirleyici yapmak adına, gerilim değerleri kısa ark, orta ark ve uzun ark olarak 3 farklı ark türü oluşturacak şekilde seçilecektir. Ark akımı için ise tel sürme hızı 3 farklı grup seçilip, incelenecektir (Çizelge 1). Deneyler boyunca sabit tutulan gazaltı kaynak parametreleri ve değerleri Çizelge 2 ve Çizelge 3’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Deneysel iş planı  
Table 1. Experimental work plan

Parametre No	Ark Türü	Ark Boyu	Ark Gerilimi (Volt)	Tel Hızı (m/dk)	Ark Akımı (Amper)
1	Kısa	35	21,6	8	216
2	Kısa	35	22,9	10	255
3	Kısa	35	25,0	12	269
4	Orta	50	26,0	8	210
5	Orta	50	28,5	10	240
6	Orta	50	29,9	12	266
7	Uzun	65	29,7	8	270
8	Uzun	65	32,1	10	277
9	Uzun	65	34,0	12	291

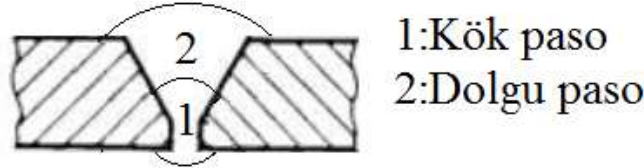
Çizelge 2. Deneyler boyunca sabit tutulan gazaltı kaynak parametreleri ve değerleri  
Table 2. Constant welding parameters and values throughout the experiments

Elektrot cinsi	Elektrot çapı (mm)	Kontakt memesi uzaklığı (mm)	Meme-iş parçası uzaklığı (mm)	Torç açısı (derece)
SG2	1,2	18	12	20°

Çizelge 3. Deneyler boyunca sabit tutulan gazaltı kaynak parametreleri ve değerleri  
Table 3. Constant welding parameters and values throughout the experiments

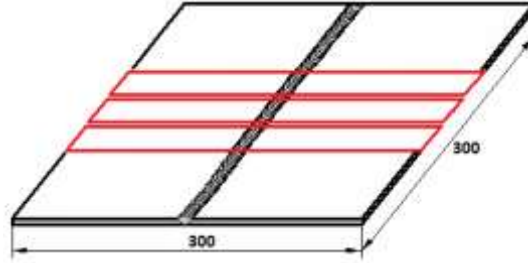
Koruyucu gaz türü	Koruyucu gaz debisi (lt/dk)	Kaynak Hızı (m/dk)	Kaynak Yönü
%82 AR-%18 CO <sub>2</sub>	12-14	40	Sağ

Çekme deneyinde doğru bilgiler elde edebilmek için kaynak işlemi ile birleştirilecek malzemelerin hepsine aynı parametrelerle 1'er adet kök paso atılmıştır. Daha sonra ise deney parametrelerine uygun olarak 1'er adet dolgu paso atılmıştır (Şekil 2). Deney numunelerinin hepsi için pasolar arası sıcaklık ise standart 250 °C alınmıştır.



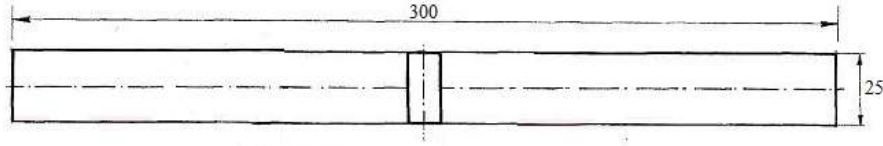
Şekil 2. Kök ve Dolgu paso  
Figure 2. Root and fill pass

Her deney için, kaynaklı birleştirmeden sonra yaklaşık 300x300x6 mm ebatlarında iş parçaları elde edilmiştir (Şekil 3). Deneysel planda bahsedildiği gibi boyundaki artış, ark geriliminin artmasına, tel sürme hızındaki artış ise, ark akımının artmasına neden olmuştur. Bu gerilim ve akım değişikliklerinin bağlantının mukavemetine etkilerini araştırmak için, her bir bağlantıdan 3 adet çekme numuneleri alınıp, tek bir doğrultuda, sabit sıcaklıkta ve sabit kabul edilebilecek bir hızda çekme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen 3 değerın ortalaması, o parametre ile birleştirilen numunenin çekme ve kopma değerleri olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 3. Kaynak işlemi sonrası iş parçası  
Figure 3. Work piece after welding process

Şekil 4’de örnek bir çekme deney numunesi ve Şekil 5’de çekme deneyinden görüntüler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4. Çekme deney numunesi  
Figure 4. Sample of tensile test



(a)



(b)

Şekil 5. Çekme deneyinden görüntüler (a,b)  
Figure 5. Views from the tensile test

## SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

1 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 109,8 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 105,0 kN’dur.

1 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 8,84mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 1,64mm olarak ölçülmüştür.

1 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet çok iyi, yanal nüfuziyet ise kararsız olmakla birlikte iyi düzeydedir.

2 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 110,2 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 107,5 kN’dur.

2 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 9,10mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 2,17mm olarak ölçülmüştür.

2 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet çok iyi, yanal nüfuziyet ise

kararlı ve iyi düzeydedir.

3 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 115,3 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 100,0 kN'dur.

3 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 9,47mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 2,33mm olarak ölçülmüştür.

3 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet çok iyi, yanal nüfuziyet ise kararlı ve çok iyi düzeydedir.

4 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 112,7 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 102,7 kN'dur.

4 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 9,79mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 1,35mm olarak ölçülmüştür.

4 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet iyi, yanal nüfuziyet ise kararsız fakat iyi düzeydedir.

5 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 107,7 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 98,7 kN'dur.

5 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 10,56mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 1,75mm olarak ölçülmüştür.

5 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet iyi, yanal nüfuziyet ise kararsız fakat orta düzeydedir.

6 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 106,3 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 88,0 kN'dur.

6 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 9,85mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 2,46mm olarak ölçülmüştür.

6 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet orta, yanal nüfuziyet ise kararsız fakat orta düzeydedir.

7 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 95,2 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 76,3 kN'dur.

7 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 10,42mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 0,95mm olarak ölçülmüştür.

7 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet orta, yanal nüfuziyet ise kararsız fakat orta düzeydedir.

8 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 100,5 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 91,0 kN'dur.

8 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 10,49mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 1,35mm olarak ölçülmüştür.

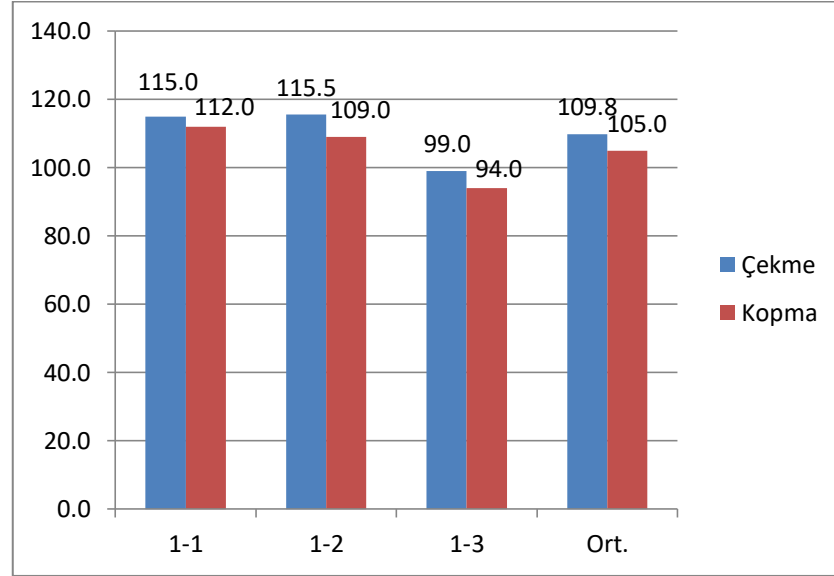
8 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet orta, yanal nüfuziyet ise kararsız fakat orta düzeydedir.

9 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için çekme deneyinde kopma, kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Bu parametre ile elde edilen 3 numunenin, ortalama çekme mukavemeti 97,8 kN, ortalama kopma mukavemeti ise 80,2 kN'dur.

9 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için kaynak dikiş genişliği 10,53mm, kaynak dikiş yüksekliği ise 1,93mm olarak ölçülmüştür.

9 numaralı parametre ile elde edilmiş numune için, düşey nüfuziyet kötü, yanal nüfuziyet ise kararsız fakat orta düzeydedir.

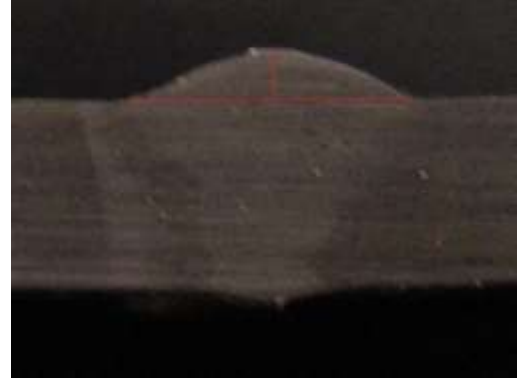
1 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 6'da, çekme deneyi görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 1 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 6. Tensile test graph results for sample that has number 1 parameter



(a)



(b)



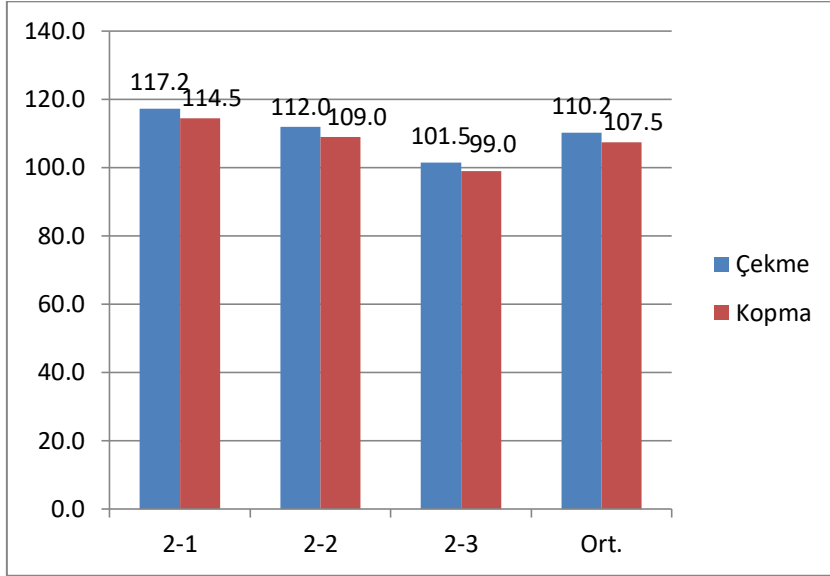
(c)

Şekil 7. 1 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görüntüsü (a), 1 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 1 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 7. Broken view of a sample that has number 1 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 1 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 1 parameter (c)



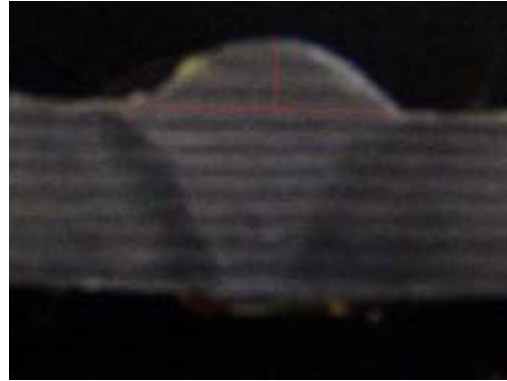
2 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 8’de, çekme deneyi görüntüleri Şekil 9’da gösterilmiştir.



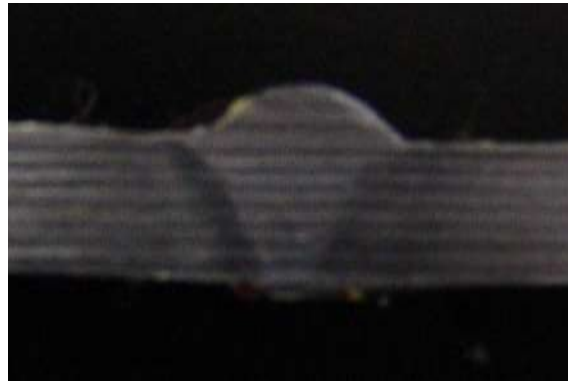
Şekil 8. 2 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 8. Tensile test graph results for sample that has number 2 parameter



(a)



(b)

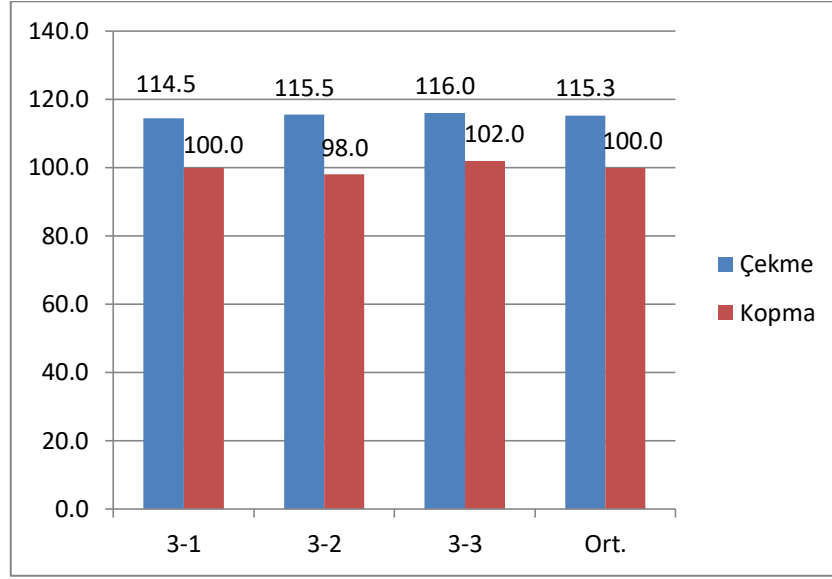


(c)

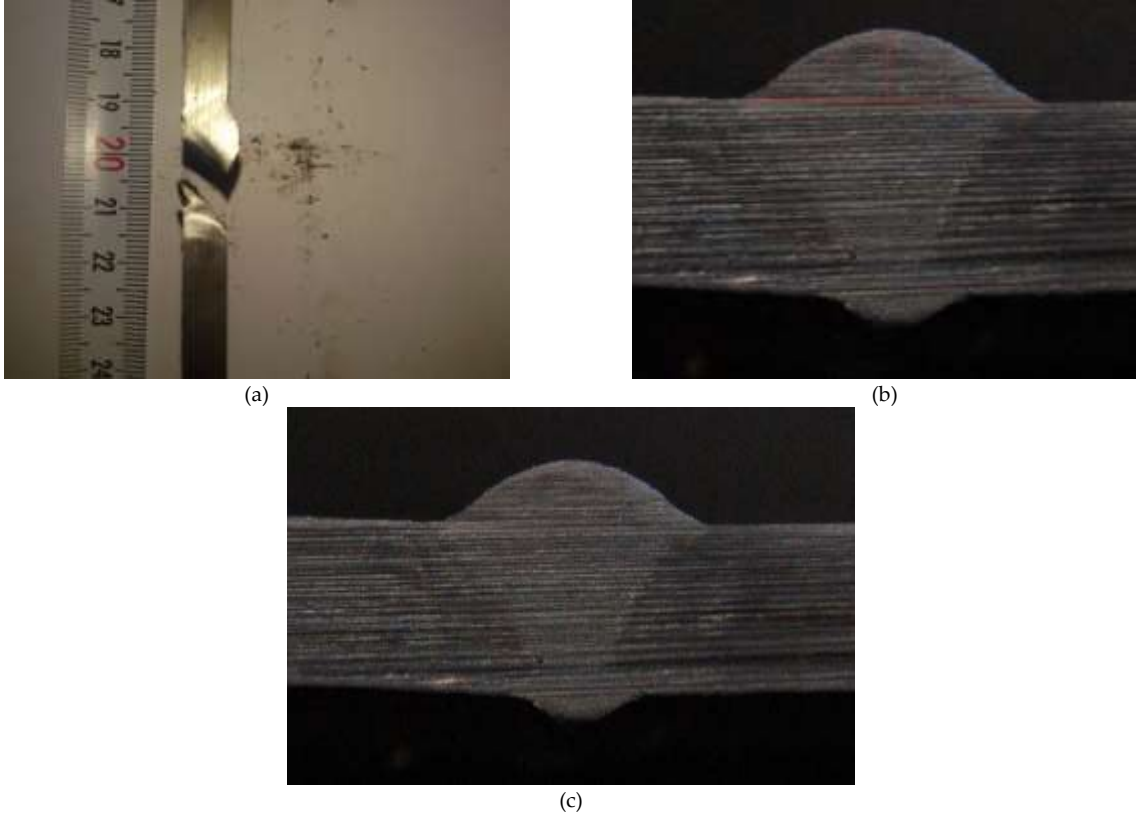
Şekil 9. 2 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 2 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 2 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 9. Broken view of a sample that has number 2 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 2 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 2 parameter (c)

3 numaraları parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 10'da, çekme deneyi görüntüleri Şekil 11'de gösterilmiştir.



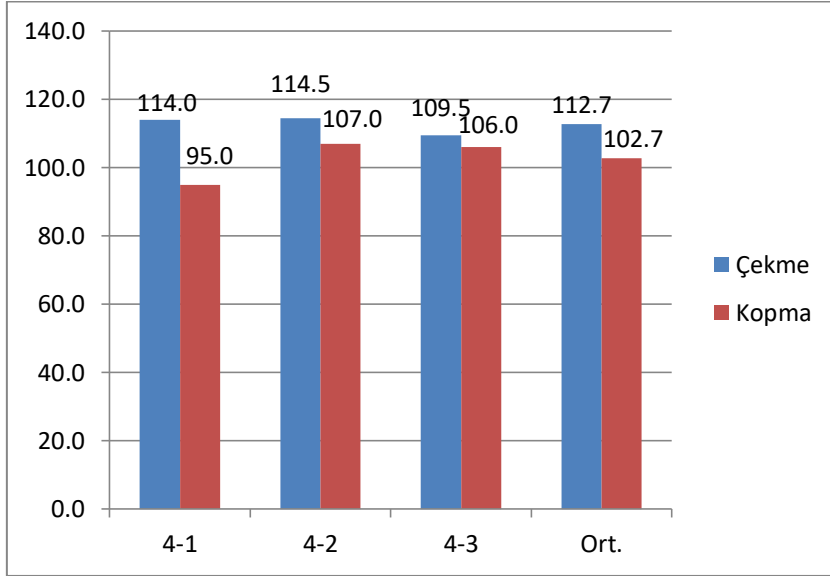
Şekil 10. 3 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 10. Tensile test graph results for sample that has number 3 parameter



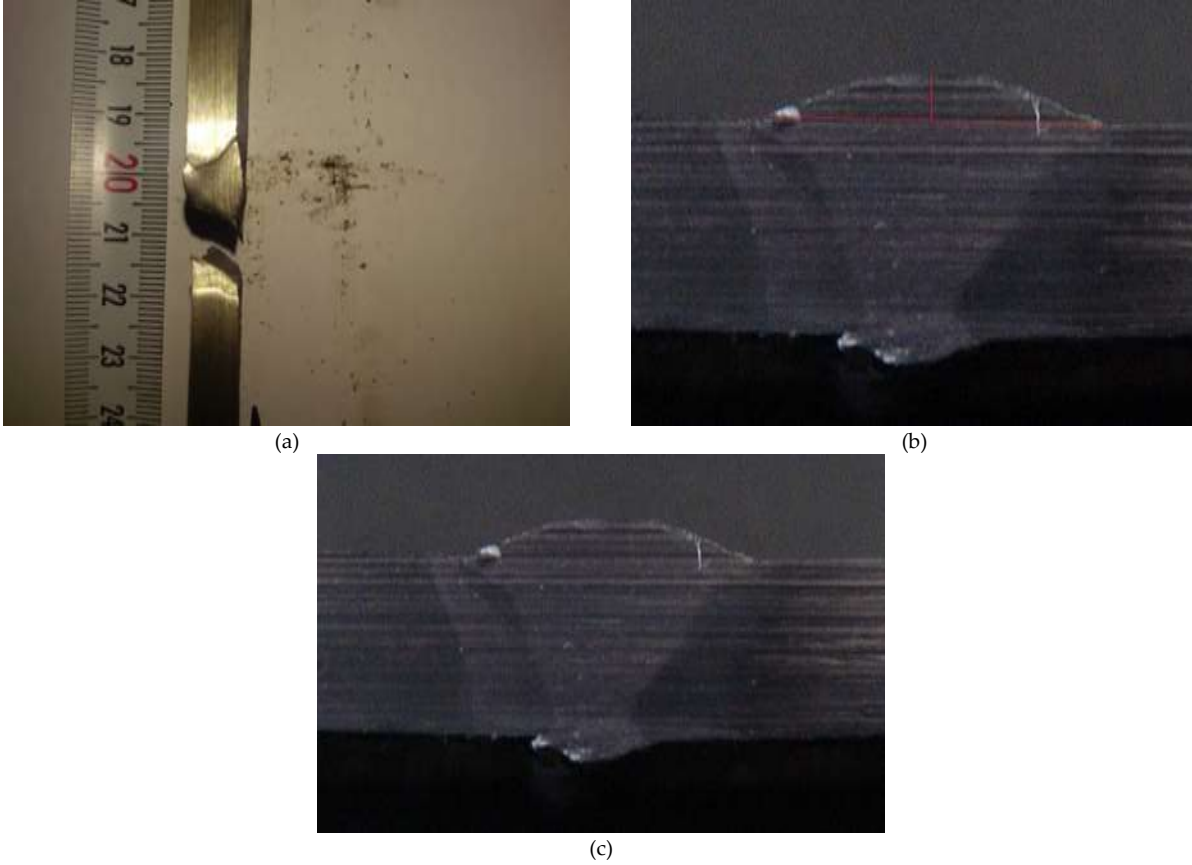
Şekil 11. 3 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 3 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 3 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 11. Broken view of a sample that has number 3 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 3 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 3 parameter (c)

4 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 12’de, çekme deneyi görüntüleri Şekil 13’de gösterilmiştir.



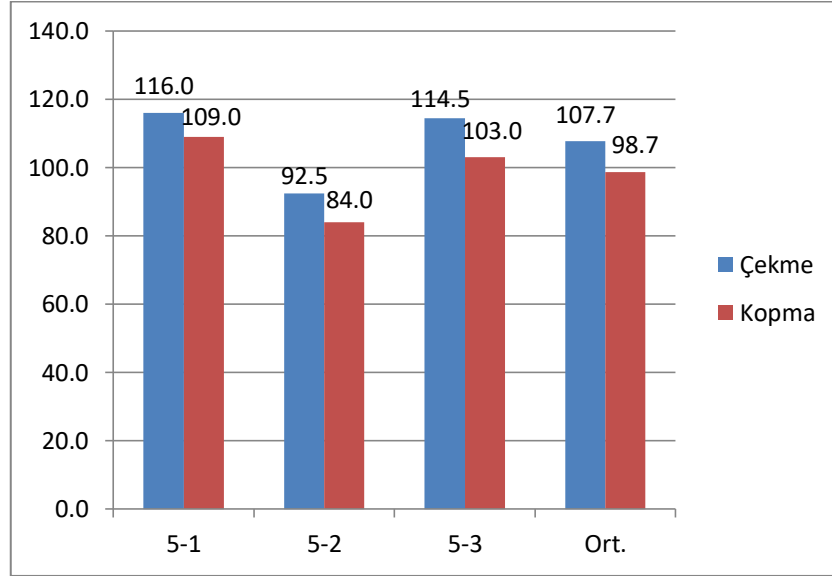
Şekil 12. 4 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 12. Tensile test graph results for sample that has number 4 parameter



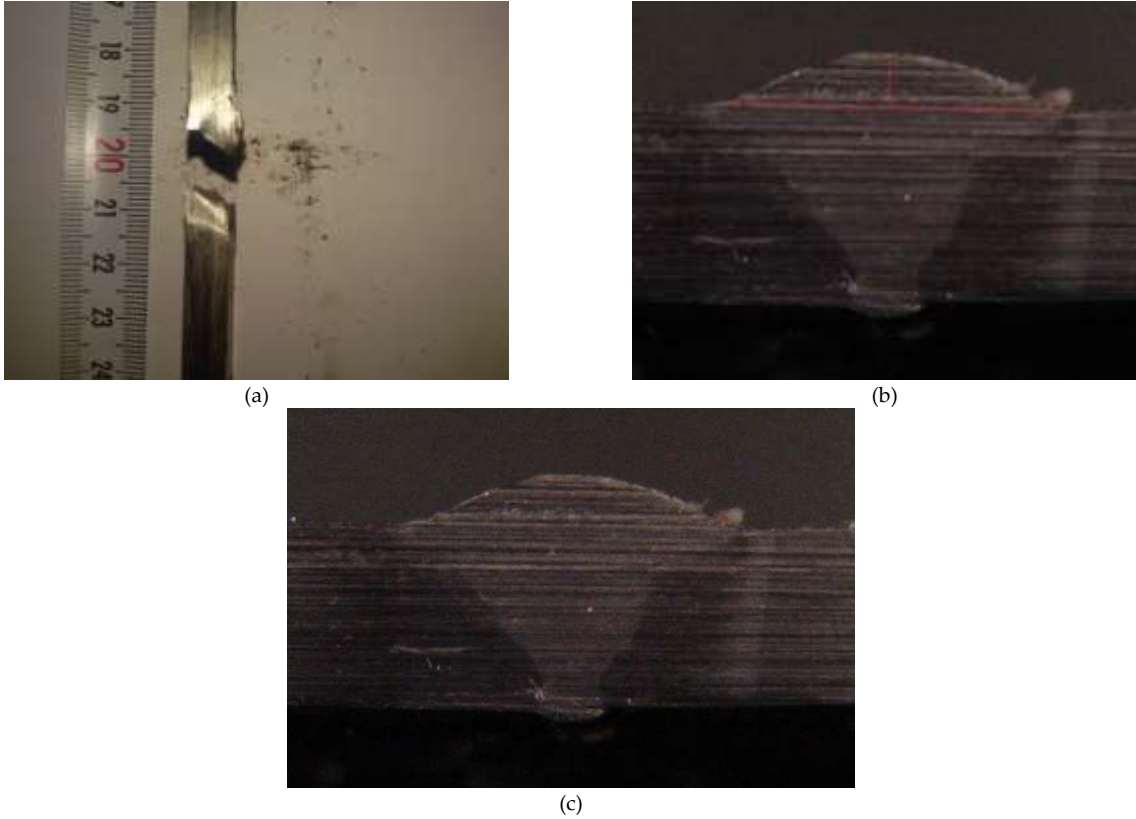
Şekil 13. 4 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 4 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 4 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 13. Broken view of a sample that has number 4 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 4 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 4 parameter (c)

5 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 14'de, çekme deneyi görüntüleri Şekil 15'de gösterilmiştir.



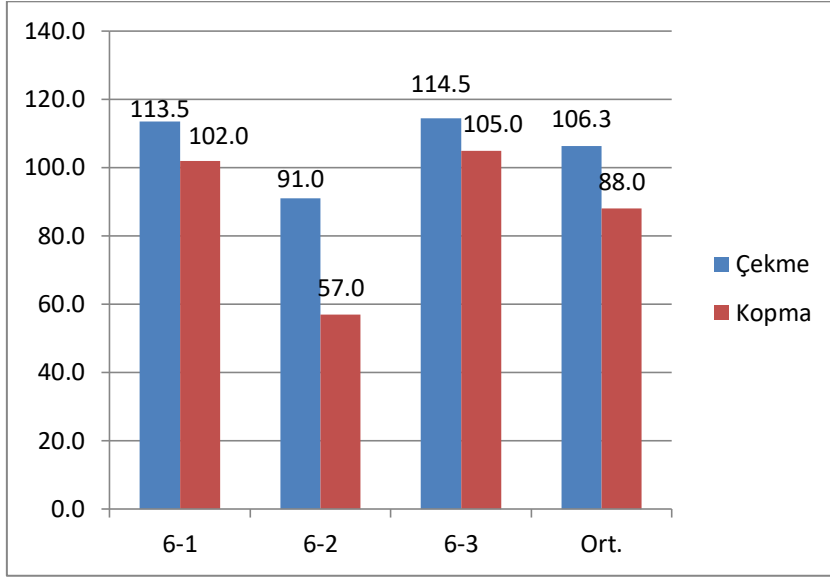
Şekil 14. 5 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 14. Tensile test graph results for sample that has number 5 parameter



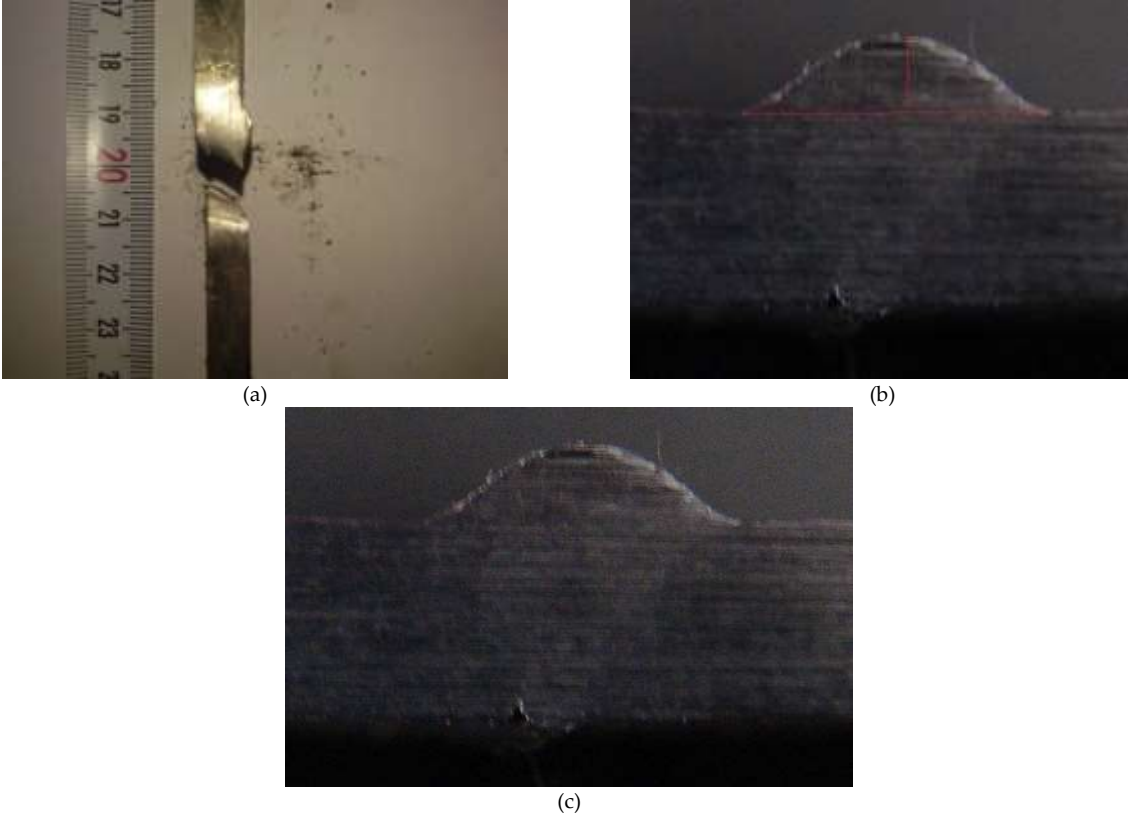
Şekil 15. 5 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 5 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 5 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 15. Broken view of a sample that has number 5 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 5 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 5 parameter (c)

6 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 16'da, çekme deneyi görüntüleri Şekil 17'de gösterilmiştir.



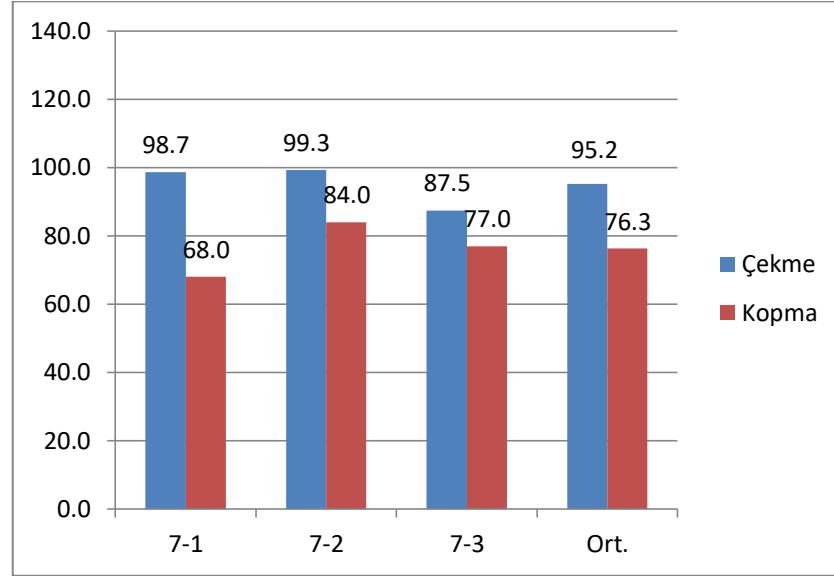
Şekil 16. 6 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 16. Tensile test graph results for sample that has number 6 parameter



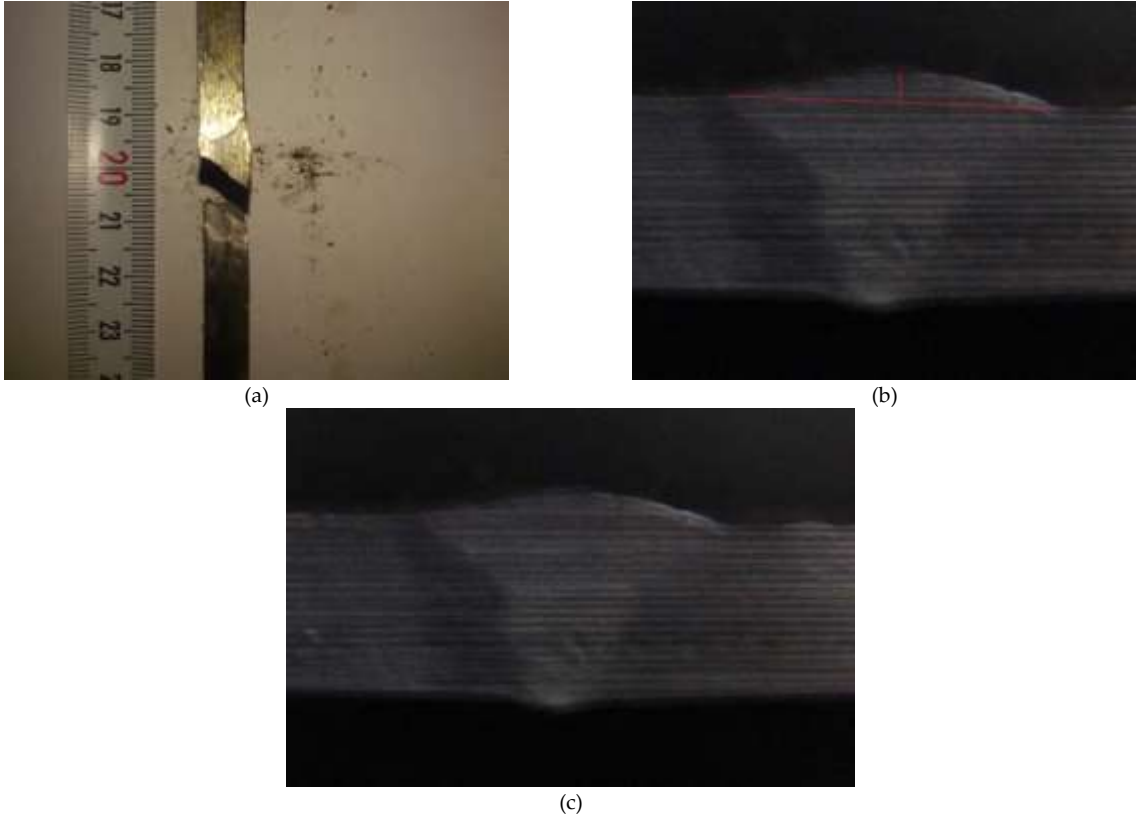
Şekil 17. 6 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 6 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 6 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 17. Broken view of a sample that has number 6 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 6 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 6 parameter (c)

7 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 18'de, çekme deneyi görüntüleri Şekil 19'da gösterilmiştir.



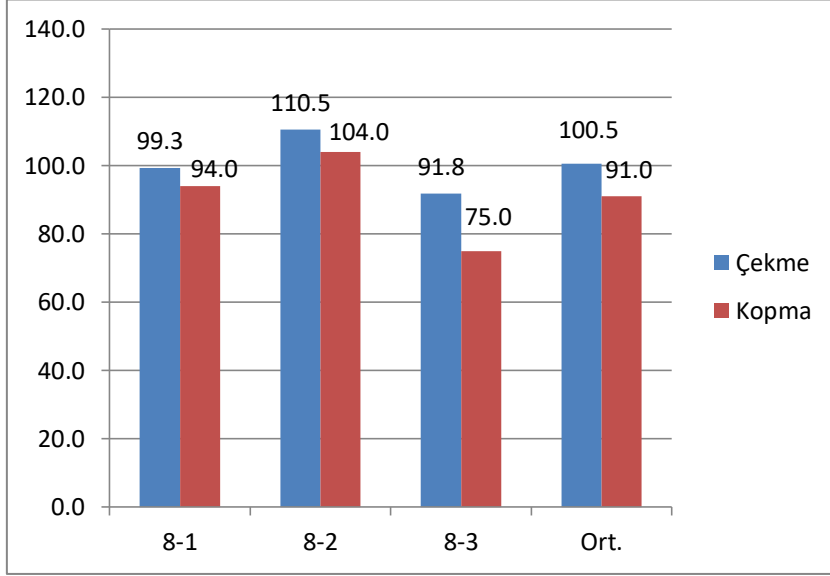
Şekil 18. 7 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 18. Tensile test graph results for sample that has number 7 parameter



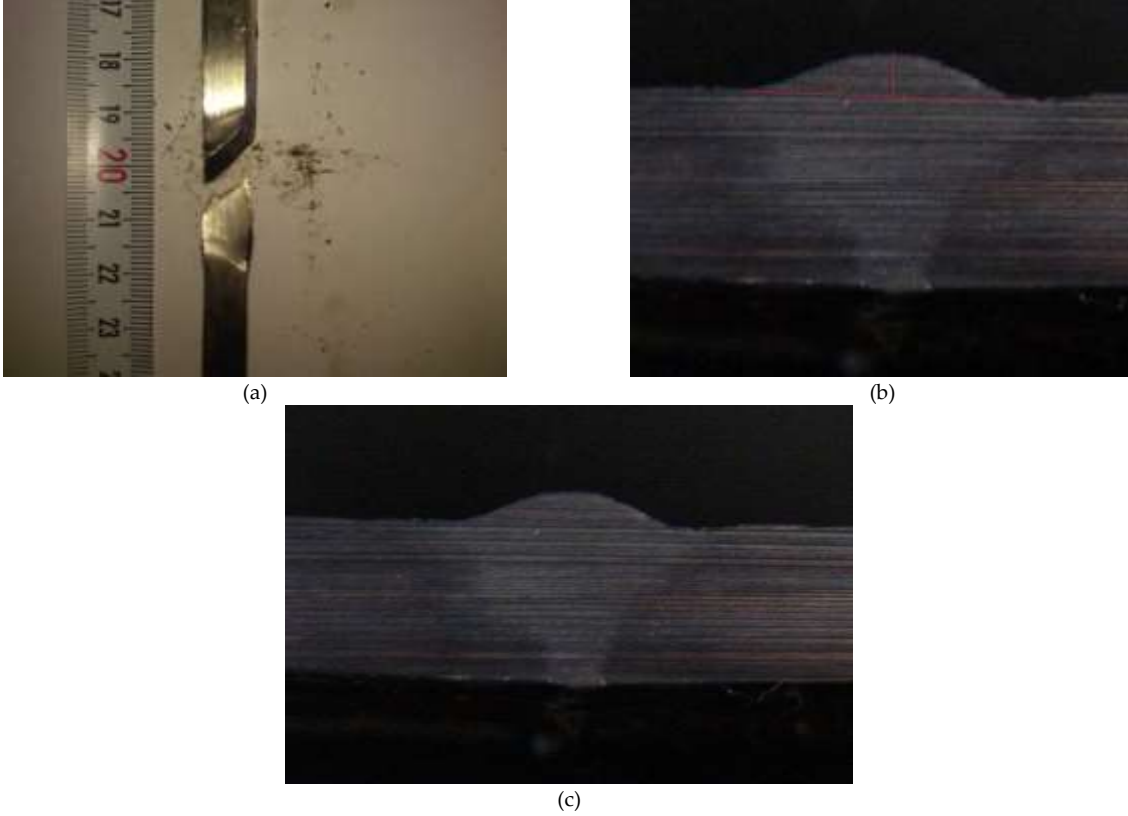
Şekil 19. 7 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 7 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 7 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 19. Broken view of a sample that has number 7 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 7 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 7 parameter (c)

8 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 20’de, çekme deneyi görüntüleri Şekil 21’de gösterilmiştir.



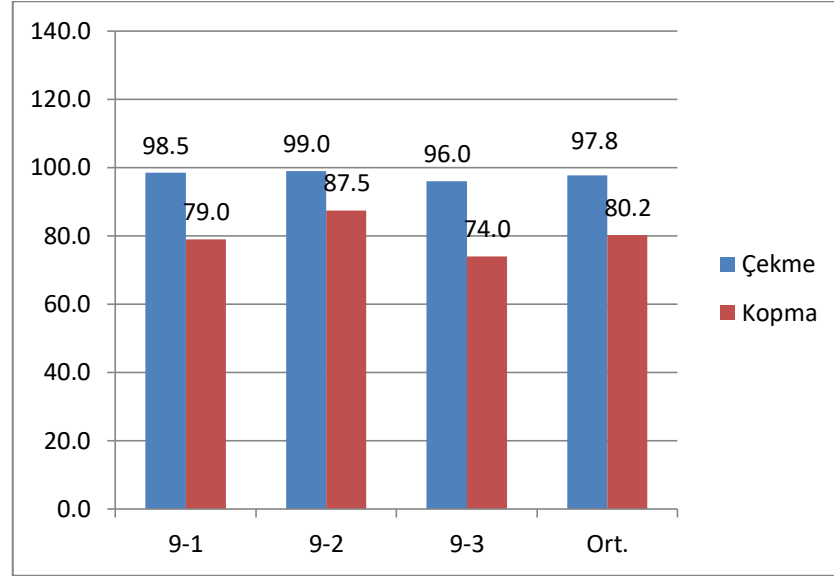
Şekil 20. 8 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 20. Tensile test graph results for sample that has number 8 parameter



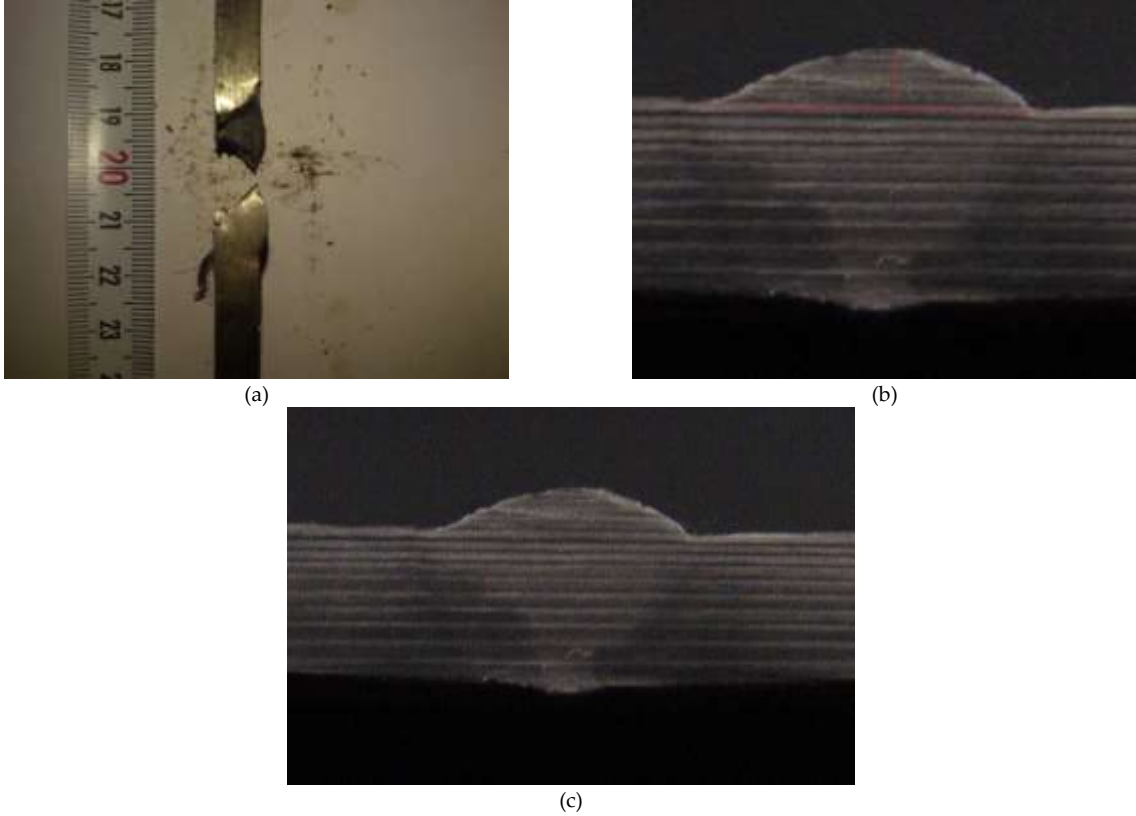
Şekil 21. 8 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 8 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 8 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 21. Broken view of a sample that has number 8 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 8 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 8 parameter (c)

9 numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deney sonuçları grafiği Şekil 22'de, çekme deneyi görüntüleri Şekil 23'de gösterilmiştir.



Şekil 22. 9 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin çekme deneyi sonuçları grafiği  
Figure 22. Tensile test graph results for sample that has number 9 parameter



Şekil 23. 9 Numaralı parametre için çekme deneyi uygulanmış numunenin kopmuş görünüşü (a), 9 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak dikişi makro görüntüsü (b), 9 Numaralı parametre ile elde edilmiş numunenin kaynak nüfuziyeti makro görüntüsü (c)

Figure 23. Broken view of a sample that has number 9 parameter after tensile test (a), Macro view of welding seam for sample that has number 9 parameter (b), Macro view of dilution for sample that has number 9 parameter (c)



Yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme ve kopma değerleri, tablo halinde Çizelge 4 de belirtilmiştir. Gerekli karşılaştırmaları daha rahat yapmak için kaynak bağlantısının, dikiş genişlikleri ve yükseklikleri Çizelge 5 de, nüfuziyetleri ise Çizelge 6 da tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4. Parametre sırasına göre çekme deneyi sonuçları

Table 4. The Tensile test results according to parameter order

Par. No	Tel Hızı (m/dk)	Ark Akımı (Amper)	Ark Türü	Ark Gerilimi (Volt)	Çek. Değeri (kN)	Kop. Değeri (kN)	Ortalama Çekme Değeri (kN)	Ortalama Kopma Değeri (kN)
1	8	216	Kısa	21,6	109,8	105,0		
2	10	255	Kısa	22,9	110,2	107,5	111,8	104,2
3	12	269	Kısa	25,0	115,3	100,0		
4	8	210	Orta	26,0	112,7	102,7		
5	10	240	Orta	28,5	107,7	98,7	108,9	96,5
6	12	266	Orta	29,9	106,3	88,0		
7	8	270	Uzun	29,7	95,2	76,3		
8	10	277	Uzun	32,1	100,5	91,0	97,8	82,5
9	12	291	Uzun	34,0	97,8	80,2		

Çizelge 5. Parametre sırasına göre kaynak dikiş genişlikleri ve yükseklikleri

Table 5. The width and height of welding seam according to parameter order

Par. No	Tel Hızı (m/dk)	Ark Akımı (Amper)	Ark Türü	Ark Gerilimi (Volt)	Kaynak Dikiş Gen. (mm)	Kaynak Dikiş Yüks. (mm)	Ark Türüne Göre Ort. Kay. Dik. Gen. (mm)	Ark Türüne Göre Ort. Kay. Dik. Yük. (mm)
1	8	216	Kısa	21,6	8,84	1,64		
2	10	255	Kısa	22,9	9,10	2,17	9,13	2,04
3	12	269	Kısa	25,0	9,47	2,33		
4	8	210	Orta	26,0	9,79	1,35		
5	10	240	Orta	28,5	10,56	1,75	10,06	1,85
6	12	266	Orta	29,9	9,85	2,46		
7	8	270	Uzun	29,7	10,42	0,95		
8	10	277	Uzun	32,1	10,49	1,35	10,48	1,41
9	12	291	Uzun	34,0	10,53	1,93		

Çizelge 6. Parametre sırasına göre kaynak nüfuziyetleri

Table 6. The dilution according to parameter order

Par. No	Tel Hızı (m/dk)	Ark Akımı (Amper)	Ark Türü	Ark Gerilimi (Volt)	Düşey Nüfuziyet	Yanal Nüfuziyet
1	8	216	Kısa	21,6	Çok İyi	İyi Fakat Kararsız
2	10	255	Kısa	22,9	Çok İyi	İyi ve Kararlı
3	12	269	Kısa	25,0	Çok İyi	Çok İyi ve Kararlı
4	8	210	Orta	26,0	İyi	İyi Fakat Kararsız
5	10	240	Orta	28,5	İyi	Orta ve Kararsız
6	12	266	Orta	29,9	Orta	Orta ve Kararsız
7	8	270	Uzun	29,7	Orta	Orta ve Kararsız
8	10	277	Uzun	32,1	Orta	Orta ve Kararsız
9	12	291	Uzun	34,0	Kötü	Orta ve Kararsız

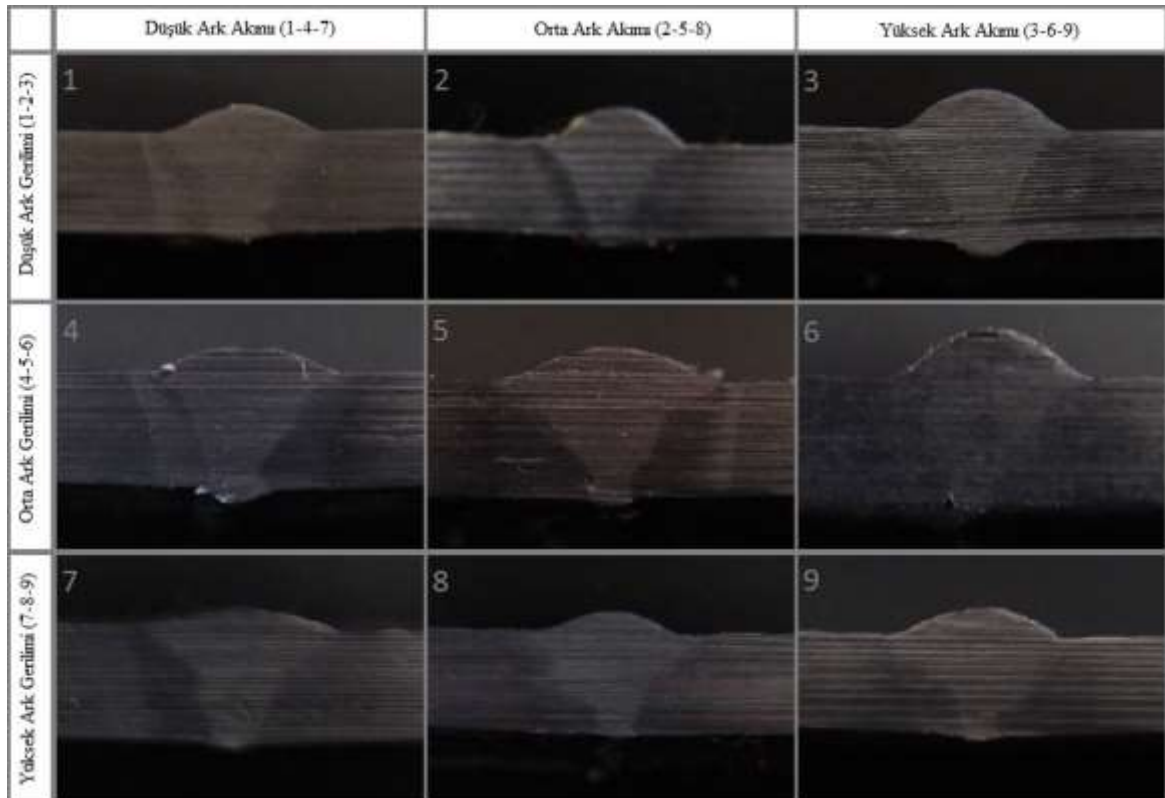
1, 2 ve 3 numaralı parametreler için Şekil 7, Şekil 9 ve Şekil 11 incelendiğinde, düşük ark gerilimi için, ark geriliminin artışı ile doğru orantılı olarak kaynak dikiş genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak kaynak dikiş genişliklerinin de, orta ve yüksek ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş genişliklerinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Yine Şekil 7, Şekil 9 ve Şekil 11 incelendiğinde düşük ark gerilimi için kaynak dikiş yüksekliklerinin, orta ve yüksek ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş yüksekliklerinden genel olarak daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu tespitler düşük ark gerilimi nedeniyle oluşan kısa ark boyunun doğal bir sonucudur.

4, 5 ve 6 numaralı parametreler için Şekil 13, Şekil 15 ve Şekil 17 incelendiğinde, orta ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş genişliklerinin, düşük ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş genişliklerinden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu durum düşük ark gerilimine göre, ark geriliminin artması sonucu oluşan orta ark boyunun doğal bir sonucudur. Yine Şekil 13 ve Şekil 15 incelendiğinde orta ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş yüksekliklerinin, düşük ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş yüksekliklerinden daha küçük olduğu gözlenmiştir. Ancak 6 numaralı parametre için ise bu durumun aksi söz konusudur. Şekil 17 incelendiğinde kaynak dikiş yüksekliğinin, aynı ark akımındaki, düşük ark gerilimi ile elde edilen 3 numaralı parametreden dahi yüksek, fakat kaynak dikiş genişliğinin aynı ark boyuna sahip 4 ve 5 numaralı parametrelerden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durumun nedeni de ark geriliminin artması sonucu oluşan orta ark boyu sebebiyle, düşey ve yanal nüfuziyetin, derinlik arttıkça 3, 4 ve 5 nolu parametrelere göre daha düşük olması ve yüksek ark akımı için artırılmış olan tel besleme hızının, yığılma miktarını artırmış olmasıdır.

7, 8 ve 9 numaralı parametreler için Şekil 19, Şekil 21 ve Şekil 23 incelendiğinde yüksek ark gerilimi için, ark geriliminin artışı ile doğru orantılı olarak kaynak dikiş genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak yüksek ark gerilimi elde edilen kaynak dikiş genişliklerinin de, düşük ve orta ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş genişliklerinden genel olarak daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Yine Şekil 19, Şekil 21 ve Şekil 23 incelendiğinde yüksek ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş yüksekliklerinin, düşük ve orta ark gerilimi ile elde edilen kaynak dikiş yüksekliklerinden daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu tespitler düşük ve orta ark gerilimine göre, ark geriliminin fazlaca artması sonucu oluşan uzun ark boyunun doğal bir sonucudur.

Ayrıca her ark boyu için, ark akımının artışı ile kaynak dikiş yüksekliğinin arttığı da gözlenmiştir. Bu durumun nedeni de, ark akımının artması için tel besleme hızının artırılması sonucu, yığılma miktarının artmasıdır.

1, 2 ve 3 numaralı parametreler için Şekil 7, Şekil 9 ve Şekil 11 incelendiğinde düşük ark gerilimi için düşey nüfuziyetin çok iyi, yanal nüfuziyetinin iyi ve ark akımının artışı ile doğru orantılı olarak daha da arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 24. Ark akımı ve gerilimine göre kaynak nüfuziyeti makro görüntüleri

Figure 24. Macro view of dilution according to arc current and voltage

4, 5 ve 6 numaralı parametreler için Şekil 13, Şekil 15 ve Şekil 17 incelendiğinde orta ark gerilimi için düşey nüfuziyetin genel olarak iyi, yanal nüfuziyetin ise genel olarak orta seviyede olduğu tespit edilmiştir. Ark akımının arttırılması için, tel besleme hızının arttırılmasıyla, fazlaca eriyen kaynak teli, orta ark gerilimi sonucu oluşan orta ark boyu nedeniyle, kaynak dikişinin yüksekliğini arttırarak, dikişin üst kısımlarında arkın hızlıca soğumasına neden olmuştur. Bunun sonucunda düşey ve yanal nüfuziyette artan ark akımına karşılık düşüş tespit edilmiştir.

7, 8 ve 9 numaralı parametreler için Şekil 19, Şekil 21 ve Şekil 23 incelendiğinde yüksek ark gerilimi için düşey ve yanal nüfuziyetin genel olarak orta ve kötü seviyede olduğu tespit edilmiştir. Yüksek ark gerilimi sonucu oluşan uzun ark boyu nedeniyle düşey nüfuziyet, derinlik arttıkça diğer ark boylarına oranla daha düşüktür. Yanal nüfuziyet ise dikişin üst kısımlarında oldukça iyidir. Ancak ark akımının arttırılması için, tel besleme hızının arttırılmasıyla, fazla eriyen kaynak teli, yüksek ark gerilimi sonucu oluşan uzun ark boyu nedeniyle, kaynak dikiş genişliğini arttırarak, dikişin üst kısımlarında daha geniş ve büyük bir ısı transferi yüzeyi oluşturmuştur. Bunun sonucunda ark hızlı bir şekilde soğuyarak ana malzemeyi yeteri kadar eritememiş ve derinlik arttıkça düşey ve yanal nüfuziyette diğer ark boylarına oranla kötü seviyede sonuçlar oluşmuştur.

Birleştirilen parçalar arasında en yüksek çekme değeri 115,3 kN olan 3 numaralı parametre ile düşük ark gerilimi sonucu oluşan kısa arka yapılan birleştirmeye elde edilmiştir. Bunun sebebi, hem kısa arka düşey ve yanal nüfuziyetin orta ve uzun arka göre daha iyi olması hem de oluşan kaynak dikiş genişliğinin orta ve uzun arka göre daha küçük olması sebebiyle daha yavaş bir soğumanın meydana gelmesidir. Bilindiği gibi kaynak dikiş genişliği aynı zamanda ısı transferine olanak sağlayan yüzeyi oluşturduğu için, kaynak dikiş genişliği arttıkça soğuma hızı da artar. Soğuma hızıyla doğru orantılı olarak kaynak dikiş bölgesinde iç gerilmelerin olduğu bilindiğinden, kaynak dikişinin hızlı soğuması, birleştirilen numune için çekme değerine üzerine olumsuz bir etki yaratacaktır.

Çekme değerinin maksimum olabilmesi için ark akımı ve ark geriliminin birbiri ile uyumlu olması gerekir. Örneğin 3 numaralı parametreyi inceleyerek, düşük ark geriliminde ark akımının artışı, nüfuziyeti ve dolayısıyla çekme mukavemetini arttırmıştır. Çünkü, artan akım etkisiyle ark bölgesine ısı girdisi arttığından, ark malzemeyi eriterek daha iyi bir nüfuziyet sağlamıştır. Artan akım etkisi ile malzemeye daha fazla ısı girdisi olmasına rağmen, düşük ark gerilimi sonucu oluşan kısa ark boyundan kaynaklanan özellikle düşey nüfuziyet sonucu kaynak dikişindeki ısı transfer yüzeyinin darlığı, burada bir avantaj oluşturup, yavaş bir soğuma ve düşük bir iç gerilim yaratarak, çekme mukavemetini arttırmıştır. İşte bu sebeple düşük ark gerilimi sonucu oluşan kısa ark için, ark akımının artışıyla çekme değerinin arttığını 1, 2 ve 3 numaralı parametrelere bakarak rahatlıkla söyleyebiliriz.

Orta ark gerilimi ile birleştirilen numunelerden elde edilen sonuçlara bakıldığında, düşük ark gerilimi ile birleştirilen numuneler ile arasında çekme değeri bakımından hissedilir bir fark gözlenmemiştir. Burada daha çok dikkat çeken husus, ark akımının artışı ile çekme değerinin düşmesidir. Bunun nedeni, ark akımının artması için tel sürme hızının arttırılmasıyla birlikte yığma miktarının artarak, kaynak dikiş yüksekliğini ve genişliğini arttırması nedeniyle, kaynak banyosunun ısı transferine olanak sağlayan yüzeyinin artması ve daha hızlı bir soğumanın meydana gelmesidir. Bu hızlı soğumanın sonucu olarak derinlik arttıkça düşey ve yanal nüfuziyetin azaldığını, iç gerilmelerin oluştuğunu ve çekme değerinin de düştüğünü 4, 5 ve 6 numaralı parametrelere bakarak rahatlıkla söyleyebiliriz. Buradan hareketle, düşük ark geriliminde ark akımının artması nüfuziyeti ve çekme değerini artırırken, orta ark geriliminde ark akımının artması, nüfuziyeti ve çekme değerini düşürmüştür. Ayrıca nüfuziyet bakımından da oldukça kararsız bir yapı oluşturmuştur.

Yüksek ark gerilimi ile birleştirilen numunelerden elde edilen çekme değeri sonuçlarına bakıldığında, düşük ve orta ark gerilimi ile elde edilen numunelere göre ortalama %10-15 daha düşük sonuçlar gözlenmiştir. Bunun nedeni, yüksek ark gerilimi sonucu oluşan uzun ark boyu nedeniyle, kaynak dikişinde derinlik arttıkça, nüfuziyet bakımından diğer ark boylarına oranla yetersiz ve kötü seviyede sonuçlar oluşmasıdır. Yine uzun ark boyu nedeniyle kaynak dikiş genişliğinin, diğer ark boylarına oranla daha büyük olması, burada başka bir dezavantaj daha oluşturup, kaynak dikişinde ısı transferine olanak sağlayan yüzeyi artırarak, hızlı bir soğuma ve yüksek iç gerilmeler yaratmış ve

dolayısıyla çekme mukavemetini düşürmüştür. Uzun ark boyundan kaynaklanan genel olarak yetersiz nüfuziyet ile kaynak dikiş genişliğinin neden olduğu hızlı soğuma ve yüksek iç gerilmeler 7, 8 ve 9 numaralı parametreler ile elde edilen numuneleri, diğer ark boylarıyla elde edilen numunelere göre, çekme değeri bakımından oldukça zayıf kılmıştır. Uzun ark boyu sebebiyle oluşan yetersiz nüfuziyeti gidermek için ark akımını artırmak da burada bir çözüm oluşturmayıp, yalnızca yığılma miktarını ve dolayısıyla kaynak dikiş genişliğini ve yüksekliğini artmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada deneysel uygulama yapılabilmesi için gerekli olan numunelerin elde edilmesinde ve deneylerin yapılmasında katkı ve desteklerinden dolayı HÜRSAN A.Ş. ile MPG A.Ş. çalışanlarına ve Malzeme Mühendisi Kısmet BOZOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu makale Ahmet AKIN'ın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Anık, S., 1972, Kaynak Tekniği (Tozaltı Kaynağı ve Koruyucu Gazla Kaynak), Cilt 2, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu.
- Aslanlar, S. 2009, Elektrik Ark Kaynak Teknolojisi ve Uygulamaları, Elektrik Ark Kaynak ve Gaz Eritme Kaynak Teknolojisi Ders Notu (Yayınlanmamış), Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü, s.15.
- (<http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/kaynak-teknolojisi-salim-aslanlar.pdf> )
- Hooda, A., Dhingra, A., Sharma, S., 2012, "Optimization Of MIG Welding Process Parameters to Predict Maximum Yield Strength In AISI 1040", International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (IJMERR), ISSN 2278-0149, Vol. 1, pp. 203-213.
- Kobe Steel. 2011. Essential Factors in Gas Metal Arc Welding, 141-8688, 19.
- Kul A., 2009, Endüstriyel Kaynak Robotlarında Kullanılan Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesine ve Nüfuziyetine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Nuraini, A. A., Zainal, A. S., Azmah, M. A., 2014, "The Effects Of Welding Parameters on Butt Joints Using Robtic Gas Metal Arc Welding", Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES), ISSN 2289-4659, Vol. 6, pp. 988-994.
- Shoeb, M., Parvez, M., Kumari, P., 2013, "Effect of MIG Welding Input Process Parameters On Weld Bead Geometry On HSLA Steel," International Journal of Engineering Science and Technology, 0975-5462, Vol. 5 (1), pp. 200-212.
- Tülbentçi, K., 1990, MIG/MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı, Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, İstanbul.
- [http://www.gedikegitimvakfi.org.tr/wp-content/uploads/2013/12/library\\_3.pdf](http://www.gedikegitimvakfi.org.tr/wp-content/uploads/2013/12/library_3.pdf)

## METAL TABAKALI KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI ENİNE DARBEYE KARŞI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Memduh KARA, <sup>2</sup>Mesut UYANER

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42370, Seydişehir, KONYA

<sup>2</sup> Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42130, KONYA

<sup>1</sup>mkara@konya.edu.tr, <sup>2</sup>muyaner@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 08.02.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.02.2016)

**ÖZ:** Bu çalışmada metal kompozit levhaların düşük hızlı enine darbe davranışları incelenmiştir. 1 mm kalınlığında St37 DKP çelik ve 1050-H14 alaşımlı alüminyum plakalar kullanılarak dört farklı yerleşim düzeninde oluşturulan üç katmanlı kompozit levhalar farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerine maruz bırakılmışlardır. 150x150 mm ebatlarında kesilen metal levhalar üç alüminyum, üç çelik, alüminyum+çelik+alüminyum ve çelik+alüminyum+çelik olacak şekilde dizilerek dört tarafı ankastre olacak şekilde bağlanmıştır. Deneylerde kullanılan vurucu kütlesi 6,35 kg olup 24 mm yarı küresel geometriye sahiptir. Hazırlanan her bir deney numunesinin ortasına 10J, 20J, 30J, 40J ve 50J enerji seviyelerinde darbe testleri yapılmıştır. Darbe testleri sonucu elde edilen kuvvet-zaman, hız-zaman ve kuvvet-yer değiştirme değişimleri grafikler halinde incelenmiştir. Her bir deney numunesinde meydana gelen hasarların boyutları ve hasar şekilleri değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Metal tabakalı kompozit, Enine darbe, Hasar davranışı, Dinamik cevap

### Investigation of Low Velocity Transverse Impact Behavior of Metal Laminated Composites

**ABSTRACT:** In this study, transverse impact behavior of laminated metal composites was investigated. Four different configuration namely (Al)<sub>3</sub>, (St)<sub>3</sub>, (Al+St+Al) and (St+Al+St), were made by using St37 DKP and 1050-H14 Al alloy which all in 1 mm thick. Three layered composites were tested under various impact energies. The panels were cut in 150x150 mm dimensions and they were restricted from their four sides. Impactor that used in tests has mass of 6.35 kg and it has 24 mm semispherical tip. Each configuration was impacted 10 J, 20 J, 30 J, 40 J and 50 J. Retrieved data from the tests were investigated in forms of force-time, velocity-time and force-displacement. Finally, failures were evaluated for each test.

**Key Words:** Metal laminated composite, Transverse impact, Failure behavior, Dynamic response

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerde dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı verebilmesi istenir. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Üretim veya bakım sırasında kullanılan takımlar

DOI: 10.15317/Scitech.2016.56

yapı üzerine düşebilir. Bu tür darbeler düşük hızlı darbe olarak adlandırılmaktadır. Metal ve metal alaşımlarında darbe sonucunda oluşan hasar darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de örneğin içyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik durumlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar durumlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez (Kara, 2006).

Metaller, kompozitler ve sandviç malzemeler üzerinde gerçekleştirilen düşük hızlardaki darbe davranışlarıyla ilgili birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır ve analitik yöntemler geliştirilmiştir. Bu alandaki önemli çalışmaların bir kısmı şunlardır:

Dinamik yüklemeye altındaki kompozit malzemeleri karakterize etmek için ilk çalışmalar (Rotem ve Lifshits, 1971), (Lifshits, 1976) ile (Sierakowski *ve diğ.*, 1971) tarafından yapılmıştır. (Sierakowski ve Chaturvedi, 1997) ile (Abrate, 1998) çeşitli darbe modeli ve muayene yöntemlerinde ilerlemeler kaydetmişlerdir.

Tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabı analitik olarak (Ramkuar ve Chen, 1982), (Sun ve Jih, 1995) ile (Abatan *ve diğ.*, 1998) tarafından araştırılmıştır. (Gong ve Lam, 1999) tarafından düşük hızlı darbeye karşı plaka cevabının önceden tahmin edilmesi için yaklaşık bir çözüm sunulmuştur. Bu çözüm, temas kuvveti ve enine kayma şekil değiştirmesinin etkisi gibi plakanın ve takviye elemanlarının beraberce hareketlerini içerir. Hibrit tabakalı kompozit plakaların düşük hızlı darbeye bağlı cevabı kayma deformasyon teorisi kullanılarak (Lee *ve diğ.*, 1997) tarafından araştırılmıştır. (Kim ve Kang, 2001) darbe kuvvetini önceden belirlemek için enine darbeye maruz kompozit plakaların dinamik şekil değiştirmesinden yeni bir analitik metod geliştirmişlerdir.

(Martinez *ve diğ.*, 2011) 2024-T3 alüminyum alaşımını çeşitli hızlarda ve sıcaklıklarda yaptıkları çekme deneyleriyle mekanik olarak karakterize etmiş ve bu malzemeden yapılan plakaları farklı başlangıç sıcaklıklarında düşen ağırlık test cihazıyla 0,5 ve 4,5 m/s darbe hızı aralıklarında test etmişlerdir. Deneylerden elde ettikleri sonuçları literatürde aynı işlemin çeliklere uygulanmasıyla elde edilen sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Delinen alüminyum plakaların deformasyon bölgesinde çanak ve kırık oluşumu olduğunu ve bu plakaların enerji sönümlenme miktarlarının çeliğe kıyasla daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır.

(Grytten *ve diğ.*, 2009) 3,5 ve 15,8 m/s hız aralıklarında darbeye maruz kalan AA5083-H116 alüminyum plakaların deformasyonlarını deneysel olarak, negatif deformasyon sertleşmesinin, plastik anizotropinin ve ısı yumuşamanın etkilerini ise nümerik modellerle incelemişlerdir. Darbe kuvvetinin yalnızca negatif deformasyon sertleşmesinden, hasar derecesinin ve şeklinin ise sadece ısı yumuşamadan etkilendiğini belirlemişlerdir. Plastik anizotropinin etkisiz olduğu görülmüştür.

(Fan *ve diğ.*, 2011) yaptıkları çalışmada fiber-metal katmanlı (FMK) plakaları düşük hızlarda darbeye maruz bırakarak oluşan deformasyon ve hasarı incelemişlerdir. Çalışmadaki FMK 2024-0 alüminyum ve çapraz cam elyaf içermektedir. Katman miktarının artmasıyla artan plaka kalınlığının ve artan penetratör büyüklüğünün yapının darbe enerji sönümlenme kapasitesini artırdığını görmüşlerdir.

(Zucchelli *ve diğ.*, 2010) yaptıkları çalışmada DC04ED tipi düşük karbon içerikli dikdörtgen çelik plaka ve üzeri camsı emaye ile kaplı düşük karbon içerikli dikdörtgen çelik plaka olmak üzere iki farklı malzeme kullanmıştır. Bu malzemeler piezoelektrik yük ölçer içeren düşen ağırlık test cihazında düşme mesafesi değiştirilerek farklı enerji gruplarında test edilmiş ve aynı zamanda bilgisayar ortamında modelleme çalışması yapılmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde camsı emaye kaplı çelik plakaların kaplı olmayan çelik plakalara göre 6 kat daha fazla kritik enerji seviyesine sahip olduğu belirlenmiş ve modelleme çalışmalarıyla da doğrulanmıştır.

(Crupi *ve diğ.*, 2010) yaptıkları çalışmada, cam elyaf kompozit yüzü PVC göbekli sandviç ve alüminyum plaka yüzeyli alüminyum köpük göbekli sandviç malzemelerin çarpışma mukavemetlerini karşılaştırmıştır. Cam elyaf kompozit yüzü PVC göbekli sandviç yapıların düşen ağırlık testlerinde 7 kg yük kullanılmış ve 4-9 m/s hız aralığında test numuneleri üzerine bırakılmıştır. Alüminyum plaka

yüzeyle alüminyum köpük göbekli sandviç yapıların düşen ağırlık testlerinde ise yük sabit tutulurken çarpma hızı aralığı 4-8 m/s aralığında tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde cam elyaf kompozit yüzlü PVC göbekli sandviç yapıların tamamen hasar alması için gereken enerji miktarı alüminyum plaka yüzeyle alüminyum köpük göbekli sandviç yapılardan daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada düşük hızlarda darbeye maruz kalan St37 DKP çelik ve 1050-H14 alüminyum alaşımı plakalarda oluşan hasar; düşen ağırlık test cihazı ile farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen darbe deneyleriyle belirlenmiş, darbe karakteristiğini belirlemede kullanılan grafikler elde edilmiş ve hasar analizi yapılmıştır. Deneyler 4 farklı tabakalı yapı oluşturularak gerçekleştirilmiştir.

## MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

### Deney Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Specimens)

Bu çalışmada düşük hızlarda darbe deneyleri için 1 mm kalınlığında St37 DKP çelik ve 1050-H14 alüminyum alaşımı plakalar kullanılarak dört farklı yerleşim düzeninde tabakalı kompozit metal levhalar oluşturulmuştur. Kullanılan levhaların kimyasal bileşimleri aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 1.** Al 1050-H14'nin kimyasal bileşimi (%)

*Table 1. Chemical composition of Al 1050-H14 (%)*

Al	Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu
99,5	0,0 - 0,4	0,0 - 0,25	0,0 - 0,07	0,0 - 0,05	0,0 - 0,05	0,0 - 0,05	0,0 - 0,05

**Çizelge 2.** St37 Çelik malzemenin kimyasal bileşimi (%)

*Table 2. Chemical composition of St37 Steel (%)*

C (max)	N	S (max)	P (max)
0,17	0,012	0,04	0,04

Çelik ve alüminyum levhalar kullanılarak oluşturulan kompozit levhalara ait konfigürasyon yapısı Çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** Oluşturulan kompozit levhalar ve katmanları

*Table 3. The structure of the composite layers*

Deneysel İsimlendirme	Üst Tabaka	Orta Tabaka	Alt Tabaka
AÇA	Al 1050-H14	St37	Al 1050-H14
ÇAÇ	St37	Al 1050-H14	St37
3A	Al 1050-H14	Al 1050-H14	Al 1050-H14
3Ç	St37	St37	St37

### Ağırlık Düşürme Test Cihazı (Drop Weight Test Device)

Dinamik darbe testleri numunelerin düşük hızlı darbe davranışlarını elde etmek için özel olarak imal edilmiş test cihazı ile yapılmıştır. Cihaz üzerindeki vurucu 6,35 kg kütleyle sahiptir. Ağırlık düşürme test cihazı Şekil 1'de görülmektedir. Deneyde kullanılan vurucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Her bir deney numunesi dört tarafı ankastre olacak şekilde bağlanarak 10 J, 20 J, 30 J, 40 J ve 50 J darbe enerjisi seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerine maruz bırakıldı.



**Şekil 1.** Ağırlık düşürme test cihazı

*Figure 1. Drop weight test rig*

#### **Deney prosedürü (Experimental procedure)**

Deneyde kullanılacak Al ve çelik levhalar 1m x 2m boyutlarında, 1mm kalınlığında temin edilip 15cmx15cm boyutlarında levhalar kestirilmiştir. Yapılacak deneyde çelik-Al-çelik ve Al-çelik-Al kompozit levhalar 2 farklı şekilde aralarda Al ve çelik olacak şekilde ve 3 tabakanın aynı olduğu 2 kompozit levha olmak üzere 4 farklı deney grubu oluşturulmuştur. Oluşturulan kompozit levhaların kalınlığı 3 mm'dir. Oluşturulan deney numunesi dört tarafı ankastre olacak şekilde bağlanarak 10 J, 20 J, 30 J, 40 J, 50 J darbe enerjisi seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerine maruz bırakılmıştır.

#### **BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS AND DISCUSSIONS)**

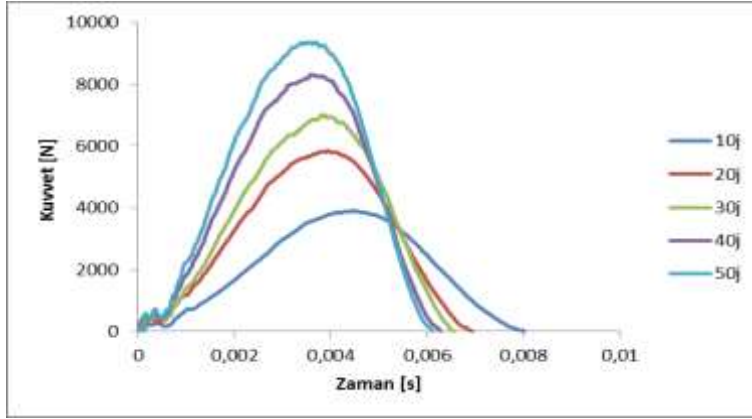
##### **Kuvvet-Zaman grafikleri (Force-Time graphs)**

Düşük hızlı darbeye maruz bir numunede çarpma hızının temas kuvvetine olan etkisini belirleyebilmek için deneylerden elde edilen veriler değişik konfigürasyonlardaki numuneler için derlenmiş ve bu değişimler Şekil 2'de gösterilmiştir.

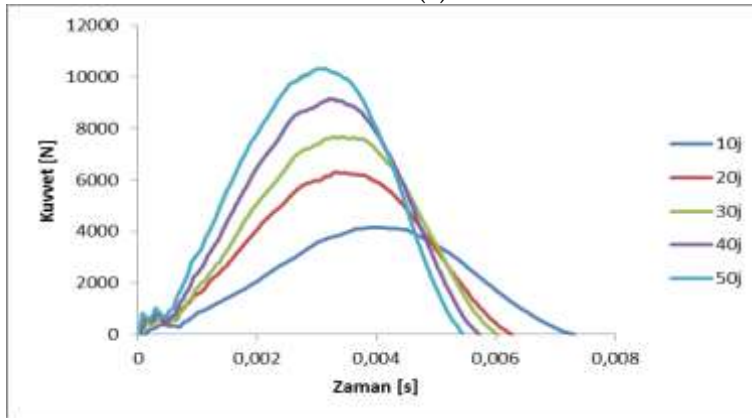
Elde edilen kuvvet-zaman değişimlerinin çingırak eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Bütün şekillerde kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sifıra düşmektedir. Her bir grafikte darbenin başlangıcında bir salınım meydana geldiği görülmektedir. Bu durum kompoziti oluşturan metal levhaların birbiri üzerine serbest olarak konmasından tabakalar arasında herhangi bir bağlayıcı olmamasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerde darbe enerjisinin artmasıyla birlikte temas süresinin azaldığı, numune üzerinde oluşan en büyük temas kuvvetinin arttığı



görülmektedir. ÇAÇ kompozit levhada gerçekleşen darbenin süresi AÇA kompozit levhada gerçekleşen darbenden daha kısa olmuştur. Bunun sebebi ÇAÇ levhada darbenin çelik tabakanın yüzeyinde gerçekleşmesidir. Çelik alüminyuma göre daha rijit olduğu için ÇAÇ kompozit AÇA kompozite göre daha rijit olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2. a) AÇA ve b) ÇAÇ Kompozit levhalar için kuvvet-zaman grafikleri

Figure 2. Force-Time graphs for a) ASA and b) SAS composite layers

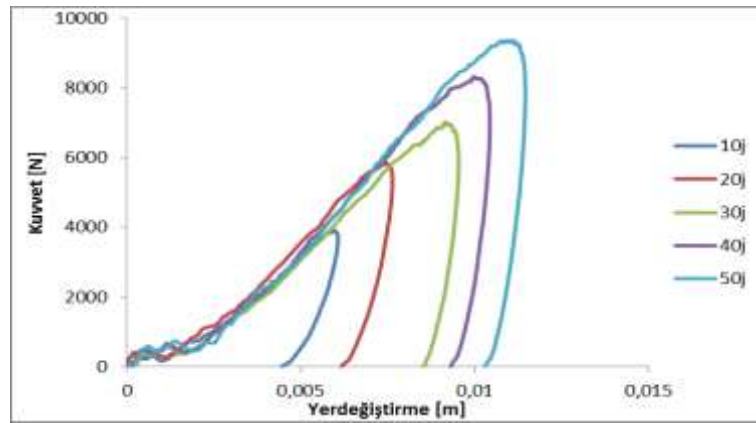
#### Kuvvet-Yer Değiştirme grafikleri (Force-Displacement graphs)

Darbeye maruz kalan kompozit metal levhaların darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-yer değiştirme (kuvvet-çökme) değişim grafikleridir. Farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış kompozit metal levhalar için elde edilen kuvvete bağlı yer değiştirme değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede yer değiştirme (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşmaya kadar devam etmiştir. Darbe enerjisi arttıkça kuvvet ve yer değiştirme miktarı artmaktadır. Kuvvet en büyük değerine ulaştığında yer değiştirme miktarı da en büyük değerine ulaşmaktadır.

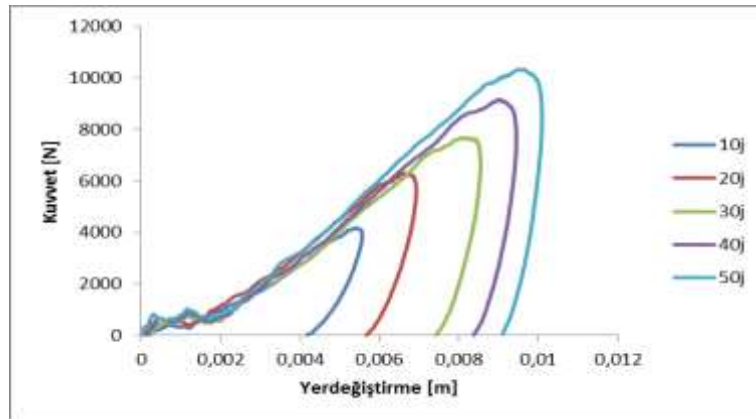
Kuvvet-yer değiştirme eğrisinde artma kısmındaki eğim darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Eğilme rijitliğindeki salınımlar ve değişimler numunede oluşan hasarlanmayı göstermektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla numunelerin eğilme rijitliğinde büyük bir değişim gözlenmemiştir. Bunun en büyük nedeni numunelerin metal malzeme olması ve rijitliğinin yüksek olmasıdır. Farklı metal levhalardan oluşan kompozit malzeme dıştan

uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmekte ve buna bağlı olarak eğilme rijitliğinde büyük bir değişim görülmemektedir. Eğilme rijitliğinde büyük bir değişimin olmaması deney numunesinde büyük hasarların saplanma ve delinme hasarlarının olmadığına işaret etmektedir. Farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit levhaların eğilme rijitliğinde ciddi değişimler olmaktadır. Şöyle ki kuvvet-yer değiştirme eğrisinin artma kısmında kuvvet belirli bir değere ulaştıncaya numune oluşan hasarlanmadan dolayı eğilme rijitliğinde keskin bir düşme meydana gelmiştir (Kara 2006).

Aynı enerji seviyesi için ÇAÇ levhada meydana gelen çökme miktarının AÇA levhada meydana gelen çökmeden daha az olduğu görülmektedir. Bunun en büyük nedeni iki çelik tabaka kullanılan numunenin daha rijit davranmasıdır.



(a)



(b)

Şekil 3. a) AÇA ve b) ÇAÇ Kompozit levhalar için kuvvet-yer değiştirme değişimleri

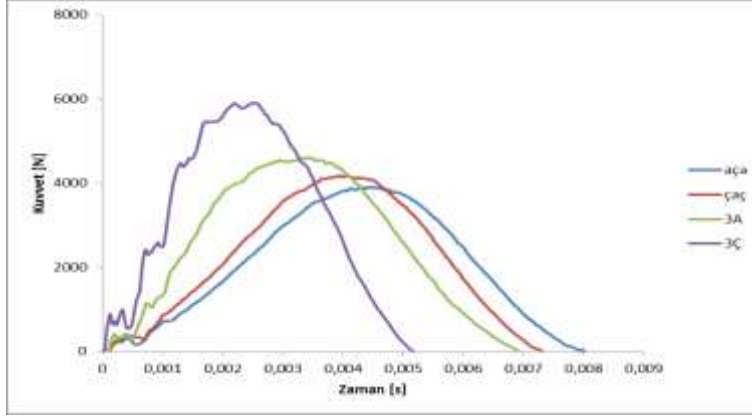
Figure 3. Force-Displacement graphs for a) ASA and b) SAS composite layers

### Metal Kompozit Levhalarda Konfigürasyonun En Büyük Temas Kuvvetine Etkisi (The Effect of Configuration on Maximum Contact Force in Metal Composite Panel)

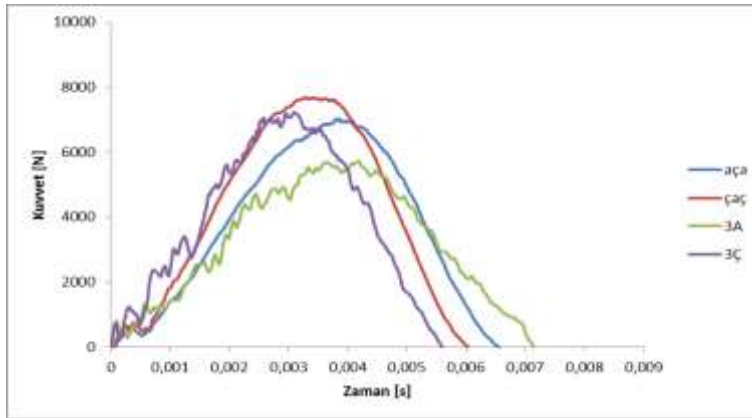
Şekil 4'te Farklı konfigürasyonlara sahip metal kompozit levhalarda a) 10J, b) 30J ve c) 50J Enerji seviyeleri için Kuvvet-Zaman Değişimi görülmektedir.

10J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet zaman değişim grafiği incelendiğinde üç katmanlı çelik yapıda en büyük temas kuvvetinin ve en düşük temas süresinin gerçekleştiği görülmektedir. Üçlü çelik yapısını üçlü alüminyum yapı takip etmektedir. ÇAÇ kompozit levhada ise darbe AÇA levhaya göre daha kısa sürede tamamlanmıştır. 30J ve 50J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet zaman değişim grafiği incelendiğinde 10J'den farklı olarak en büyük temas kuvvetinin ÇAÇ kompozit numunede olduğu, en düşük temas süresinin ise 10J'de olduğu gibi üçlü çelik yapıda gerçekleştiği görülmektedir.

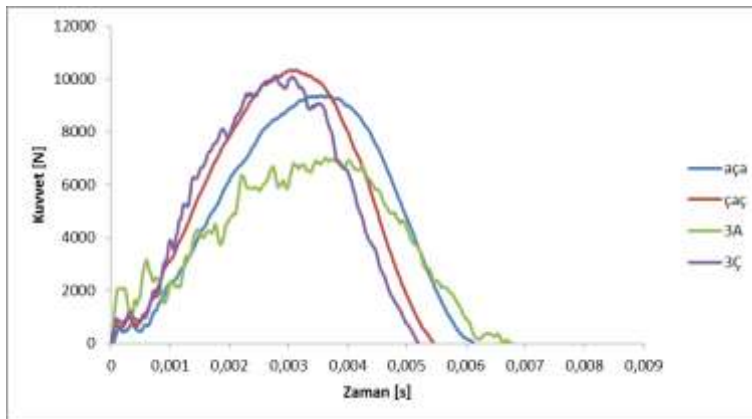
30J ve 50J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet zaman değişim grafiğinde üçlü çelik ve üçlü alüminyum levhalarda diğerlerine göre daha fazla salınım olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin darbe esnasında birlikte hareket eden tabakaların aynı özellikli olmasından ve bağlayıcı bulunmamasından dolayı meydana gelen kaymaların daha fazla olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



(a)



(b)



(c)

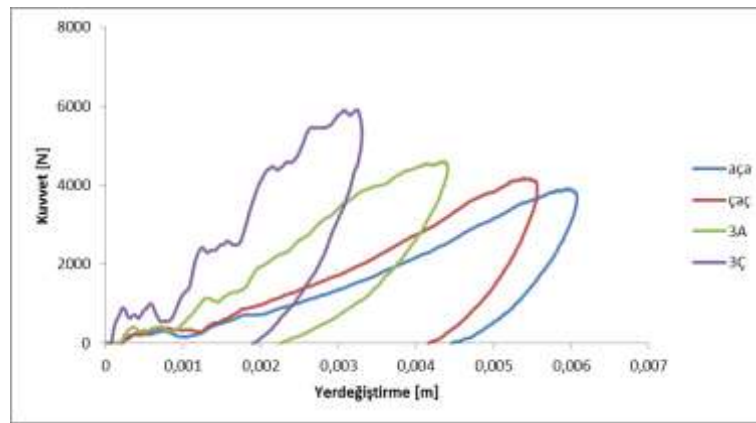
**Şekil 4.** Farklı konfigürasyonlara sahip metal kompozit levhalarda a) 10J, b) 30J ve c) 50J enerji seviyeleri için kuvvet-zaman değişimleri

*Figure 4.* Force-Time histories for metallic composite layers with different configurations at a) 10J, b) and c) 50J energy levels

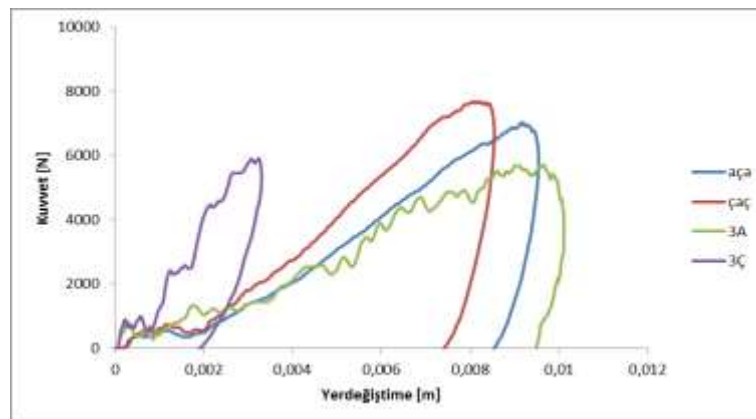
### Metal Kompozit Levhalarda Konfigürasyonun Kuvvet-Yer değiştirme Değişimine Etkisi (The Effect of Configuration on The Force versus Displacement in Metal Composite Panel)

Şekil 5'te farklı konfigürasyonlara sahip metal kompozit levhalarda a) 10J, b) 30J ve c) 50J Enerji seviyeleri için Kuvvet-yer değiştirme değişimi görülmektedir. 10J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet yer değiştirme değişim grafiği incelendiğinde üç katmanlı çelik yapıda en büyük eğilme rijitliğinin gerçekleştiği görülmektedir. Üçlü çelik yapıyı üçlü alüminyum yapı takip etmektedir. En düşük eğilme rijitliği AÇA kompozit levhada görülmüştür.

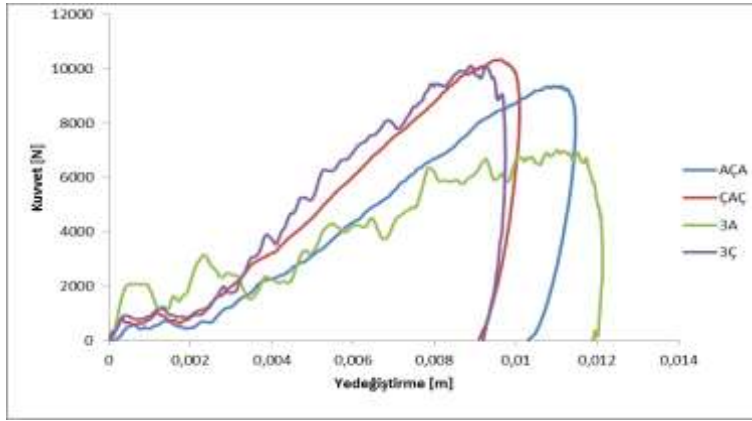
30J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet yer değiştirme değişim grafiği incelendiğinde 10J'de olduğu gibi üç katmanlı çelik yapıda en büyük eğilme rijitliğinin gerçekleştiği görülmektedir ancak en düşük eğilme rijitliği üçlü alüminyum kompozit levhada görülmüştür. 50J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet yer değiştirme değişim grafiği incelendiğinde üç katmanlı çelik yapıda ve ÇAÇ kompozit yapıda meydana gelen eğilme rijitliğinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. En düşük eğilme rijitliği 30J enerji seviyesinde olduğu gibi üçlü alüminyum kompozit levhada görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

























**Şekil 5.** Farklı konfigürasyonlara sahip metal kompozit levhalarda a) 10J, b) 30J ve c) 50J Enerji seviyeleri için kuvvet-yer değiştirme değişimleri

*Figure 5.* Force-Displacement histories for metallic composite layers with different configurations at a) 10J, b) and c) 30J) 50J energy levels

#### Hasar Analizi (Failure Analysis)

Şekil 6'da farklı enerji seviyeleri için AÇA kompozit levhada oluşan hasarlar görülmektedir. Şekilde kompozit levhanın ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen hasar görünümlerine ilaveten her bir tabakanın ön ve arka yüzeylerinde görülen hasarlar verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her tabakada çökmeler meydana gelmiş ancak saplanma veya delinme görülmemiştir. Darbe enerjisi arttıkça tabakalardaki çökme miktarı da artmaktadır. Bu numune için en büyük çökme üst alüminyum levhada gerçekleşmiştir.

Şekil 7'de farklı enerji seviyeleri için ÇAÇ, Şekil 8'de farklı enerji seviyeleri için AAA ve Şekil 9'da farklı enerji seviyeleri için ÇÇÇ kompozit levhada oluşan hasarlar görülmektedir. Tüm konfigürasyonların içinde aynı enerji seviyeleri için en büyük çökme miktarının üçlü alüminyum yapıda en küçük çökme miktarının üçlü çelik yapıda gerçekleştiği tespit edilmiştir. En büyük çökmelerin olduğu üçlü alüminyum yapıda herhangi bir saplanma veya delinme gözlenmemiştir.

AÇA LEVHA	GENEL GÖRÜNÜM		ÜST PLAKA		ORTA PLAKA		ARKA PLAKA	
	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA
10 J								
30 J								
50 J								

Şekil 6. Farklı enerji seviyeleri için AÇA kompozit levhada oluşan hasarlar

























Figure 6. Damage zones of ASA composite layers for different energy levels

ÇAÇ LEVHA	GENEL GÖRÜNÜM		ÜST PLAKA		ORTA PLAKA		ARKA PLAKA	
	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA
10 J								
30 J								
50 J								

**Şekil 7.** Farklı enerji seviyeleri için ÇAÇ kompozit levhada oluşan hasarlar

*Figure 7. Damage zones of SAS composite layers for different energy levels*



























3A LEVHA	GENEL GÖRÜNÜM		ÜST PLAKA		ORTA PLAKA		ARKA PLAKA	
	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA
10 J								
30 J								
50 J								

Şekil 8. Farklı enerji seviyeleri için AAA kompozit levhada oluşan hasarlar

Figure 8. Damage zones of AAA composite layers for different energy levels



3Ç LEVHA	GENEL GÖRÜNÜM		ÜST PLAKA		ORTA PLAKA		ARKA PLAKA	
	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA	ÖN	ARKA
10 J								
30 J								
50 J								

Şekil 9. Farklı enerji seviyeleri için ÇÇÇ kompozit levhada oluşan hasarlar

Figure 9. Damage zones of SSS composite layers for different energy levels

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada düşük hızlarda darbeye maruz kalan St37 DKP çelik ve 1050-H14 alüminyum alaşımı kompozit plakalarda oluşan hasar; düşen ağırlık test cihazı ile farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen darbe deneyleriyle belirlenmiş, darbe karakteristiğini belirlemede kullanılan grafikler elde edilmiş ve hasar analizi yapılmıştır. Deneyler 4 farklı tabakalı yapı oluşturularak gerçekleştirilmiştir.

- Kuvvet-zaman değişim eğrilerinde darbe enerjisinin artmasıyla birlikte temas süresi azalmakta, numune üzerinde oluşan en büyük temas kuvveti artmaktadır. ÇAÇ kompozit levhada gerçekleşen darbenin süresi AÇA kompozit levhada gerçekleşen darbeden daha kısa olmuştur.

- Aynı enerji seviyesi için rijitliğin daha yüksek olmasından dolayı ÇAÇ levhada meydana gelen çökme miktarının AÇA levhada meydana gelen çökmeden daha az olduğu tespit edilmiştir.

- 10J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet zaman değişim eğrilerinde üç katmanlı çelik yapıda en büyük temas kuvveti ve en düşük temas süresi gerçekleşmiştir. 30J ve 50J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet zaman değişim eğrilerinde ise 10J'den farklı olarak en büyük temas kuvvetinin ÇAÇ kompozit numunede en düşük temas süresi ise 10J'de olduğu gibi üçlü çelik yapıda gerçekleşmiştir.

- 10J enerji seviyesi için elde edilen kuvvet yer değiştirme değişim eğrilerinde üç katmanlı çelik yapıda en büyük eğilme rijitliğinin gerçekleştiği görülmektedir. Üçlü çelik yapısını üçlü alüminyum yapı takip etmektedir. En düşük eğilme rijitliği AÇA kompozit levhada görülmüştür. 30J enerji seviyesi için üç katmanlı çelik yapıda en büyük eğilme rijitliğinin gerçekleştiği görülmektedir ancak en düşük eğilme rijitliği üçlü alüminyum kompozit levhada görülmüştür. 50J enerji seviyesi için üç katmanlı çelik yapıda ve ÇAÇ kompozit yapıda meydana gelen eğilme rijitliğinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. En düşük eğilme rijitliği 30J enerji seviyesinde olduğu gibi üçlü alüminyum kompozit levhada görülmüştür.

- Numunelerde meydana gelen hasarlar incelendiğinde her tabakada çökmeler meydana gelmiş ancak saplanma veya delinme oluşmamıştır. Darbe enerjisi arttıkça tabakalardaki çökme miktarı da artmaktadır. Bu çalışma için en büyük çökme üçlü alüminyum levhada gerçekleşmiştir.

## KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 10201142 numaralı Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abatan, A., Hu, H., Olowokere, D., 1998, "Impact Resistance Modeling of Hybrid Laminated Composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 11, pp. 249-260.
- Abrate, S., 1998, *Impact on Composite Structures*, Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.
- Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., 2010, "Low-Velocity Impact Strength of Sandwich Materials", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 13, pp. 409-426.
- Fan, J.Z., Guan, W., Cantwell, W. J., 2011, "Numerical Modeling of Perforation Failure in Fiber Metal Laminates Subjected To low Velocity Impact Loading", *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 2430-2436.
- Gong, S.W., Lam, K.Y., 1999, *Transient Response of Stiffened Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact*, *Composites, Part B*, Vol. 30, pp. 473-484.
- Grytten, F., Børvik, T., Hopperstad, O.S., Langseth, M., 2009, "Low Velocity Perforation of AA5083-H116 Aluminium Plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 597-610.
- Kara, M., 2006, *Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 93s.
- Kim, J.K., Kang, K.W., 2001, "An Analysis of Impact Force in Plain-weave Glass-epoxy Composite Plates Subjected to Transverse Impact", *Composite Science and Technology*, Vol. 61, pp. 135-143.

- Lee, Y.S., Kang, K.H., Park, O., 1997, "Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact", *Computers & Structures*, Vol. 65, pp. 965-974.
- Lifshitz, J.M., 1976, "Impact Strength of Angle Ply Fiber Reinforced Materials", *Journal of Composite Materials*, Vol. 10, pp. 92-101.
- Ramkumar, R.L., Chen, P.C., 1982, "Low Velocity Impact Response of Laminated Plates", *AIAA Journal*, Vol. 21, pp. 1448-1452.
- Rodríguez-Martínez, J. A., Rusinek, A., Arias, A. 2011, "Thermo-Viscoplastic Behaviour of 2024-T3 Aluminium Sheets Subjected to Low Velocity Perforation at Different Temperatures", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, pp. 819-832.
- Rotem, A., Lifshitz, J.M., 1971, "Longitudinal Strength of Unidirectional Fibrous Composite under High Rate Of Loading" *Proc. 26th Annual Tech. Conf. Soc. Plastics Industry Reinforced Plastics, Composites Division, Washington, DC, Section 10-G: pp. 1-10.*
- Sierakowski, R.L., Nevil, G.E., Ross, A., Jones, E.R., 1971, "Dynamic Compressive Strength and Failure of Steel Reinforced Epoxy Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, pp. 362-377
- Sierakowski, R.L., Chaturvedi, S.K., 1997, *Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites*, Publisher: Wiley-Interscience, New York, NY, United States.
- Sun, C. T., C. J. Jih., 1995, "Quasi-static Modeling of Delamination Crack Propagation in Laminates Subjected to Low-velocity Impact", *Composites science and technology*, Vol. 54.2, pp.185-191.
- Zucchelli, A., Minak, G., Ghelli, D., 2010, "Low-velocity Impact Behavior of Vitreous-Enameled Steel Plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 673-684.



## ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOFİBER TABAKALI HAVA FİLTRESİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

<sup>1</sup>Kevser DİNCER, <sup>2</sup>Gürol ÖNAL, <sup>3</sup>Ahmet AKDEMİR, <sup>4</sup>Mehmet SELBES

<sup>1,2,4</sup>Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Müh. Bölümü KONYA

<sup>3</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meram/KONYA

<sup>1</sup>kdincer@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>gonal@selcuk.edu.tr, <sup>3</sup>aakdemir@selcuk.edu.tr, <sup>4</sup>mselfbes@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.04.2016)

**ÖZ:** Bu çalışmada, makro boyuttaki gözeneklere sahip farklı malzemelerin, yüzeylerinin filtreleme performansını arttırmak amacıyla, elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabaka ile kaplanması amaçlanmıştır. Çalışma sonunda sadece mikrofiber filtrelerin yüzeyine kaplanan nanofiber tabakaların filtre olarak kullanılabilirliği görülmüştür. Mikro partiküllerin filtrasyonunda kullanılan 25-85g/m<sup>2</sup> gramaj arasındaki mikrofiber filtrelerin yüzeyi, polimer solüsyonu besleme debisi 21-30ml/h, uygulanan gerilim 28-32kV ve elektrotlar arası mesafe 19-23cm aralığında elektro-eğirme deney parametreleri ile kaplanmıştır. Nanofiber tabaka ağırlığı 2-4g/m<sup>2</sup>, nanofiber çapı 77-200nm arasında değişen beş farklı hava filtresi numuneleri elde edilmiştir. Elektro-eğirme deney parametrelerindeki değişim ile nanofiber tabaka ağırlığı, nanofiber çapı ve yüzey morfolojisindeki değişimler gözlenmiş ve üretilen numunelere etkisi incelenmiştir. Sonuçta, makro gözenekli malzemelerin nanofiber tabakalı filtre olarak kullanılamayacağı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Nanofiber hava filtresi, Tabakalı hava filtresi, Elektro eğirme, Mikrofiber filtreler

### Production and Characterization of Air Filters with Nanofiber Layers Via Electro-Spinning Method

**ABSTRACT:** In this study, the surface of different materials having pores in the macro size are covered by a nanofiber layer with the electro-spinning method in order to improve the filtering performance. Only microfiber filters could be effectively used as a filter layer coated on the surface of the nanofiber. The used filtration of micro particles between 25-85g/m<sup>2</sup> weighted micro fiber filters surfaces were covered by electrospinning method with nanofiber layer by the experimental parameters 21-30ml/h polymer solution feed flow rate and 28-32 kV applied voltage and electrode spacing 19-23cm. The five different air filter samples ranging between 2-4 g/m<sup>2</sup> and nanofiber diameter between 77-200nm were obtained. Nano fiber layer weight, nanofiber diameter, and the surface morphology changes with the changing parameters in the electro-spinning experiments and its effect on the manufactured samples were observed. In summary it is seen that macro-porous materials can not be used as a nanofiber layer filter.

**Key Words:** Nanofiber air filter, Layer air filter, Electro-spinning, Microfiber filters

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi devrimi, insanlığın işini kolaylaştırıp konforunu arttırdığı gibi, doğal kaynakların da kirlenmesini beraberinde getirmiştir. Bu kirlenme, havada asılı olan mikro ve makro boyuttaki partiküllerden kaynaklanmaktadır. Katı ve sıvı fazda olabilen bu partiküller insan vücuduna solunum yoluyla girerek çeşitli solunum yolu rahatsızlıklarına sebep olmaktadır. Boyutlarıyaklaşık 100 nm olan virüs gibi çok küçük canlıların etkisinden korunmak için havanın etkin bir şekilde filtrelenmesi gerekmektedir. Sadece insan sağlığı için değil, yaşantımızın her alanında örneğin elektronik cihazlar, otomobil kaportalarının boyanması, mercek kaplaması, yüksek derecede duyarlı sensörlerin geliştirilmesi gibi çeşitli alanlarda ürünü toz taneciklerinden korumakve ürün kalitesini yükseltmek için etkin hava filtreleri kullanılmaktadır. Günümüzde etkin bir filtrasyon için HEPA (High Efficiency Particulate Air-Yüksek Etkinlikli Hava Filtresi) kullanılmaktadır.

Hassas filtreler yirminci yüzyılın ortalarından yüzyılın sonuna kadar cam mikrofiberlerden elde edilmekteydi. Yirmi birinci yüzyılın başında nanoteknolojinin hızla gelişmeye başlamasıyla mikrofiberlerin yerini daha küçük fiberler almıştır. Nanofiberlerin boyutlarının küçük olması, daha etkin bir filtre yapmasını beraberinde getirmektedir. Nanofiber üretiminde hızlı, tekrarlanabilir ve kütleli üretime uygun olduğundan genellikle elektro-eğirme yöntemi kullanılmaktadır. Elektro-eğirme yöntemi, nispeten daha az enerjiyle, daha az maddeyle ve çok farklı polimerle nanofiber üretimine izin vermektedir. Çok çeşitli polimerlerden üretilmesi fiberlere dolayısıyla filtreye istenilen özelliklerin verilmesine imkân sağlar. Örneğin iletken nanofiber elde edilen polimerlerin kullanılmasıyla filtreye düşük bir akım verilerek havadaki pozitif partiküller kolayca yakalanabilmektedir.

Kataphinan (2004), elektro-eğirme tarihinin 17. yüzyıla dayandığını, elektro-eğirmenin William Gilbert'in manyetizma üzerinde çalışırken tesadüfi bir şekilde elektro-magnetizmanın sıvılar üzerinde bir çekim kuvveti doğurduğunu keşfetmesiyle ortaya çıktığını ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006), 1934 yılında Formhals'ın elektrik alan kullanarak suni fiber üretim sistemi tasarlayarak elektro-eğirmeyle ilgili ilk patenti aldığını, Taylor'un 1960'lı yıllarda elektriklenmiş sıvılarla ilgili temel teorik prensipleri açıkladığını ifade etmiştir. Taylor tarafından geliştirilen bu teoride, bir elektrik alan içindeki damladan ince fiberlerin oluşması, elektriksel kuvvetler tarafından yüklenen sıvı yüzeyindeki maksimum kararsızlıktan dolayı meydana geldiğini belirtmiştir.

Ramaknisha ve diğ., (2005) ve Jayaraman ve diğ., (2004), nanofiber üretim yöntemlerini araştırmışlardır. Zahmetli ve yavaş bir metod olan elyaf çekme yönteminde, mikroskop altında bir ince çubuk, damla haldeki polimer çözeltisinin içine daldırılarak yavaşça çekerek uzun ve tek bir nanofiber elde etmişlerdir (Ramaknisha ve diğ., 2005). Feng ve diğ., (2002), farklı bir fiber üretim şekli olan kalıp sentezi metodunda, polimer çözeltisini nanogözenekli bir membrandan geçirerek üretmişlerdir. Bunun için polimer çözeltisi bir sıvı ile (örneğin su) sıkıştırılarak nanomembran içinden geçirilmiş ve katılma çözeltisi adı verilen bir solüsyon içinde nanofiber üretilmiştir (Üstündağ, 2009). Ramaknisha ve diğ., (2005), elektro-eğirme sisteminin basitçe, polimer solüsyonunu tutan bir pipet, iki elektrot (kılcal boru ve toplayıcı) ve DC (Direct Current-Doğru Akım) yüksek voltaj güç kaynağından (kV düzeyinde) oluştuğunu ifade etmişlerdir. Pipetin ucunda bulunan kılcal boru ucundaki polimer damlasının yüksek voltaj yardımıyla çekilerek fiber oluştuğunu belirtmişlerdir. Elektrikle yüklenen polimer jetinin bükülmesinden dolayı, jetin birçok parçaya ayrıldığını ve böylece çok küçük fiberler oluşturduğunu, oluşan fiber ağlarının toplayıcı adı verilen topraklanmış elektrotta yığılacağını belirtmişlerdir. Huang ve diğ., (2003), elektro-eğirme yöntemiyle 3 nm-1µm arasında sürekli nanofiberin farklı polimerlerle elde edilebildiğini ifade etmişlerdir.

Kozanoğlu (2006) ve Andray (2008) elektro-eğirme prosesinin modellenmesi ile ilgili çalışmalarda bulunmuşlardır. Andray (2008), elektro-eğirmenin ilk aşaması olan polimer damlacığının maruz kaldığı kuvvetleri açıklamıştır. Buna göre iletken polimer çözeltisinin veya eriyiğin kılcal bir boruya düşük hızda geldiğini, boru ucunda oluşan damlacığayüzey gerilimi ve yer çekimi kuvvetinin tesir ettiğini ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006), elektro-eğirme prosesinin ikinci aşamasında oluşan Taylor konisini tanımlayarak damlacık halindeki polimer çözeltisine elektriksel bir gerilim uygulandığında, kritik bir değerde damlacığın yarı küresel formdan ucunun sivrilerek geniş bir koni haline geçtiğini belirtmiştir.

Huang ve diğ., (2003) elektrik alan içindeki viskoz sıvının  $49.3^\circ$  konik formda iken yüzey gerilimi ve elektrostatik kuvvetlerin dengede olduğunu ifade etmiştir. Andray (2008), Taylor açısının polimer besleme hızı ve çözelti özelliğine bağlı olarak değişebileceğini belirtmiştir. Kozanoğlu (2006), üçüncü aşama olan polimer jeti oluşumundakritik bir geriliminin hemen üstündeki bir değerde koni ucundan polimer jetinin fışkırmasıyla elektro-eğirmenin başlayacağını ifade etmiştir. Andray (2008), kararlı bölgede polimer jeti hızının arttığını ve doğrusal bir yol izlediğini belirtmiştir. Bu sırada jet içindeki çözücünün buharlaşmasıyla polimer jeti incelendiğini ve jet hızının bu nedenle arttığını belirtmiştir. Kozanoğlu (2006) jet hızı kritik bir değere ulaştığında jetin kararsız bölgeye girdiğini belirtmiş ve bu sırada jet yüzeyindeki merkezkaç kuvvetinin jeti ittiğini söylemiştir. Jetin, toplayıcı adı verilen pozitif kutbunayaklaşmasıyla merkezkaç kuvvetin ve toplayıcıdaki çekim kuvvetinin jette kopmalar meydana getirdiğini ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006) ve Andray (2008) jetin bu kararlı bölgeden sonra kararsız bölgeye girmesiyle oluşan kuvvetlerden bahsetmişlerdir. Bu kuvvetlerin yerçekimi kuvveti, elektrostatik çekim kuvveti, coulomb itme kuvveti, jetin uzamasına ve ilerlemesine karşı yönde etki eden viskoelastik kuvvetler, jetin çekilmesine aksi yönde etki eden yüzey gerilim kuvveti ve hava ile sürtünme kuvveti olduğunu belirtmişlerdir. Andray (2008), son aşama olan katılma prosesinde, toplayıcıya ulaşan polimer jetindeki çözücünün buharlaşmasıyla katılma meydana geleceğini ve sonuçta nanofiber oluşacağını belirtmiştir.

Ko (2004) ve Daşdemir (2006) nanofiberlerin özelliklerini incelemişlerdir. Ko (2004), fiber çapının yüzey alanına göre değişimini irdeleyerek 5 nm çapındaki nanofiberlerin  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  yüzey alanına sahip olduğunu, 1000 nm çapındaki fiberlerin  $10 \text{ m}^2/\text{g}$  yüzey alanına sahip olduğunu belirtmiştir. Daşdemir (2006), nanofiberlerin mukavemetinin çok yüksek olduğunu ifade etmiştir. Bunun nedenini, nanofiberlerin yüksek kristallığe (boşluksuz, yabancı atomsuz olması) sahip olması ile açıklamıştır.

Graham ve diğ., (2002) ve Üstündağ (2009) nanofiber kullanım alanları üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Graham ve diğ., (2002), hava filtreleri olarak kullanılan nanofiberlerle ilgili araştırmalarda bulunmuştur. Buna göre aynı basınç değerinde  $1 \mu\text{m}$ 'dan küçük fiberlerin partikülleri daha verimli yakaladığını, fiber çapının küçülmesiyle yakalanan partikül boyutunun küçüleceğini, partikül yakalama veriminin artacağını tespit etmişlerdir.

Ramakrishna ve diğ., (2005), Üstündağ ve Karaca (2009), Deitzel ve diğ., (2001) ile Kozanoğlu (2006) elektro-eğirme deney parametreleri ile çalışmalarda bulunmuşlardır. Ramakrishna ve diğ., (2005), çözelti parametrelerinden molekül ağırlığının ve viskozitenin yüksek olduğu çözeltilerin jet sürekliliğinin iyi derecede olduğunu, fakat yüksek viskozitenin de, polimer pompalamasını zorlaştıracağından belli bir sınırı olduğunu ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006) konsantrasyon artışıyla boncuk oluşumunun azalacağını ifade etmiştir. Ramakrishna ve diğ., (2005), yüksek viskoziteli çözeltiyle nanofiberlerin küçük bir alanda toplanacağı, böylece büyük çaplı nanofiberlerin oluşacağını belirtmiştir. Ayrıca düzgün nanofiber üretimi için etanol veya yüzey aktif madde ilave edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Elektro-eğirme için mutlaka çözeltinin iletken olması gerektiğini, iletkenliğin ya çözeltiye iyon ilavesiyle veya elektrik alanın artırılmasıyla mümkün olabileceğini, iyi bir iletkenlik ile düzgün ve küçük nanofiberler üretilebileceğini söylemiştir. Üstündağ ve Karaca (2009), çok fazla iletkenlik ile lüle ucundaki damlacığı muhafaza etmenin zor olduğunu belirtmiştir. Ramakrishna (2005) çözücünün dielektrik özelliğinin yüksek olmasının boncuk oluşumu ve küçük fiber üretiminde faydalı olacağını, çözeltinin dielektrik özelliğini arttırmak için DMF (dimetilformamit) gibi çözücüler ilave edilebileceğini ifade etmiştir. Diğer yandan düşük konsantrasyonla fiber çapının azaldığını ifade etmiştir. Andray (2008) jetin katılma sürecinde çözeltinin uçuculuğunun fiber elde etmede önemli bir rol oynadığını yüksek uçucu çözeltiler ile çok küçük çaplı fiberlerin üretilebileceğini belirtmiştir. Deitzel ve diğ., (2001) çalışmalarında çok yüksek voltajda polimer jetinin kararsızlığının artarak boncuklu bir yapı oluştuğunu gözlemişlerdir. Ramakrishna ve diğ., (2005), polimer besleme debisinin artışı ile fiber çapının bir değere kadar arttığını ifade etmişlerdir. Deitzel ve diğ., (2001), ile Ramakrishna ve diğ., (2005), besleme hızının yüksek olması ile çözücünün yeterince buharlaşamayacağından boncuk oluştuğunu belirtmişlerdir. Demir ve diğ., (2002), poliüretan ile yaptıkları deneylerde yüksek çözelti sıcaklığında elde edilen fiberlerin daha üniform dağıldığını gözlemişlerdir. Ramakrishna ve diğ., (2005) lüle çapının dar

olmasının küçük nanofiber üretiminde faydalı olacağını söylemiştir. Ramakrishna ve diğ., (2005) ve Kozanoğlu (2006) lüle ile toplayıcı arasındaki mesafenin azalmasıyla büyük, artmasıyla küçük çaplı nanofiber oluştuğunu ifade etmiştir.

Hutten (2007) hava filtrasyonunda kullanılan keçelerin üretim metotlarını incelemiştir. Bu metotların ergitme üfleme, spunbond, ıslak yatırma ve elektro-eğirme yöntemi olduğunu ifade etmiştir. Bu metotlardan en büyük fiberin spunbond yöntemi ile en küçük fiberin ise elektro-eğirme yöntemiyle elde edileceğini belirtmiştir. Ayrıca elektro-eğirme haricindeki tüm üretim yöntemlerinde 1 µm fiber çapının altına inilmesinin pek mümkün olmadığını ifade etmiştir. Süpüren ve diğ., (2007), spunbond yönteminin ergitme üfleme (meltblown) yöntemi ile teknik olarak çok benzediğini aralarındaki farkın, fiberleri inceltmek için kullanılan havanın hacmi ve sıcaklığı olduğunu ifade etmiştir. Ergitme-üfleme metodunda fiberlerin gerdirilmesi için yüksek miktarda hava kullanıldığını, spunbond yönteminde ise polimer soğuyup katılaştığında germe işlemi yapıldığını bu sebeple üretilen fiberlerin daha kalıntabakalı olduğunu (spunbond 15-40µm, ergitme üfleme 2-10µm) bildirmiştir.

Bu çalışmada nanofiber tabaka elde etmek için elektro-eğirme yöntemi kullanılmıştır. Elektro-eğirme, uzun ve sürekli nanofiber üretilebilmesi ve prosesin tekrarlanabilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabaka oluşturulması içingözenekli yapıdakiselüloz, yüzey tülü (cam yünü), metal süzgeç, karbon mikrofiber keçe gibi farklı malzemeler kullanılarak deneyler yapılmış ve sonuçtakolay nanofiber kaplanabilmesi ve rijit olması nedeniyle spunbond mikro fiber filtrelerin üzerine kaplanan nanofiber tabakanın hava filtresi olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Elektro-eğirme deneyi farklı debi, mesafe ve elektrik gerilimde termoplastik poliüretan-dimetilformamit polimer çözeltisi kullanılarak yapılmış ve deney parametrelerinin nanofiber çapını ve ağ morfolojisini nasıl etkilediği incelenmiştir.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### Nanofiber Tabaka Üretiminde Kullanılan Malzemeler (Nanofiber Layer Used Production Materials)

Nanofiber tabaka esnek ve ince olduğundan bir altlık üzerine kaplanması gerekir. Altlık, nanofiber tabakanın rijit bir şekilde durmasını sağlayarak ona mekanik destek sağlar. Mikrofiber filtreler, ucuz, kolay tedarik edilebilmesi ve mikro boyuttaki partikülleri tutması nedeniyle altlık olarak kullanılmıştır. Altlıkların özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Burada ağırlık, filtrenin birim alan başına ağırlığını;  $\bar{\phi}$  ise ortalama fiber çapını ifade etmektedir. Filtre sınıfı ise filtrenin partikül yakalama etkinliğinin bir göstergesi olup G1-G4 büyük partiküllerin yakalanmasında kullanılmaktadır. G4 sınıfı bir filtre G2 'ye göre daha etkin partikül yakalar.

**Çizelge 1.** Altlık malzemeleri ve özellikleri

*Table 1. Substrates materials and properties*

Numune no	Filtre ismi	Ağırlık (g/m <sup>2</sup> )	Filtre sınıfı	$\bar{\phi}$ (µm)
1, 2, 3, 4	PET spunbond	85	G4	20
5	PP Monofilament	25	G2	60

Çizelge 1'de PET Spunbond mikro fiber filtre, ergimiş haldeki PET polimerin, bir ekstrüder vasıtasıyla ince delikleri olan bir kalıptan çıkarak dönme hareketi yapan bir tambur veya bant üzerine düşürülmesi ile elde edilir. Fiber çaplarının küçülmesinde, kalıba gönderilen sıcak ve hızlı havanın etkisi büyüktür. PP Monofilamentmikrofiber filtre, PP polimerinin ergitilerek spunbond filtre gibi bir ekstrüderden çıkarak fiber haline getirilmesi ve ardından fiberlerin dokunması ile elde edilir.

Elektro-eğirme işleminde polimer olarak polyester bazlı TPU kullanılmıştır. Inovenso firmasından tedarik edilen Elastollan 1085 A53 ticari isimli termoplastik poliüretanın teknik özellikleri Çizelge 2'de

gösterilmiştir. TPU polimeri kolayca tedarik edilmesi, basitçe çözeltisinin hazırlanması, elektro-eğrilebilmesi ve zehirli olmaması nedeniyle tercih edilmiştir (Daşdemir, 2006). Elastollan® -40 ile 120 °C arasında boyut kararlılığına sahiptir. Yağlara, yakıtlara, UV ışınlarına ve hidrolize dayanıklı, yüksek aşınma direncine, yüksek uzama miktarına, mukavemete ve yırtılma direncine sahiptir (Anonim, 2012a). TPU'yu çözmek için dimetilformamit DMF kullanılmıştır. Bu çalışmada, MERCK firmasının ürettiği %99.8'den daha saf olan DMF kullanılmış olup teknik özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur (Anonim, 2012b).

**Çizelge 2.** TPU granülleri ve DMF solüsyonu özellikleri

*Table 2. TPU granules and DMF solution properties*

Açıklama	TPU granül özellikleri	DMF solventinin
<b>Görünüş (20°C, 101.3kPa)</b>	Saydam olmayan granül	Renksiz sıvı
<b>Erime noktası sıcaklığı (°C)</b>	170	-61
<b>Kaynama noktası sıcaklığı</b>	Kaynamaz, yanar	153
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1150	940
<b>Zehirlilik durumu</b>	Zehirli değil	Zehirli

#### Elektro-eğirme Yöntemiyle Nanofiber Tabaka Üretimi (Nanofiber Layer Production by Electro-Spinning Method)

Elektro-eğirme deney cihazı, Inovenso marka NE 300 modeldir (Şekil 1). Deney cihazı başlıca üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar: Polimer solüsyonu besleme sistemi, yüksek voltaj güç kaynağı ve silindirik toplayıcıdır. Polimer besleme ünitesi, polimer çözeltisini ayarlanan debide lülelere göndermek; yüksek voltaj kaynağı, lüle ile silindirik toplayıcıya yüksek gerilim uygulayarak polimer çözeltisinin eğrilmesini sağlamak; silindirik toplayıcı ise üzerine sarılan altlığın yüzeyinde homojen yapıda nanofiber tabakası kaplamak amacıyla kullanılmıştır.



**Şekil 1.** Elektro-eğirme cihazı

*Figure 1. Electro-spinning device*

Elektro-eğirme cihazında, yukarı doğru spinleme yapacak şekilde, iç çapı 0.8mm olan on iki lüle yerleştirilmiştir. Nanofiberlerin toplanacağı kolektör paslanmaz çelik malzemeli, silindirik tambur olup çapı 120mm, boyu 200mm'dir. Cihazın, elektro-eğirme mesafesi 50-300mm, uygulayabileceği voltaj 5-40kV ve polimer besleme debisi 0-1000 mL/h aralında değişmektedir (Çizelge3).



Çizelge3. Elektro-eğirme deney cihazı teknik özellikleri

Table 3. Electro-spinning test equipment properties

Özellik	Açıklama
Elektro-eğirme tipi	Aşağıdan yukarıya
Elektro eğirme mesafe	50-300mm
Toplayıcı tipi	Tambur
Toplayıcı boyutu	Çap: 120mm, Boy:
Toplayıcı malzemesi	Paslanmaz çelik
Lüle sayısı, malzemesi	12 adet, pirinç
Lüle iç çapı	0.8 mm
Voltaaj aralığı	5-40 kV, 1 mA
Besleme pompası	0-1000 mL/h

Nanofiber tabakanın kaplandığı altlıklar, 380x200 mm ebatlarda mikrofiltrelerden kesilmiştir. Altlık olarak dört tane 85 g/m<sup>2</sup> PET spunbond mikrofiber filtre ile bir adet 25 g/m<sup>2</sup> PP mono filament mikrofiber filtre hazırlanmıştır. Altlıklar tek tek tartılarak ağırlıkları not edilmiştir (Çizelge 4). Elektro-eğirme deneyi için, ağırlıkça %15 polimer konsantrasyona sahip, 50g ağırlığında TPU polimer çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun için, 42.5g DMF çözücüsü ısıtıcı manyetik karıştırıcıda 110°C'ye kadar ısıtılmıştır. 7.5g TPU granülü, ısıtılan DMF'nin içine yavaşça dökülerek TPU granüllerinin tamamen erimesi beklenmiştir. TPU granülleri eridikten sonra 50mg (ağırlıkça % 0,1) sodyum klorür, solusyonun elektriksel iletkenliğini ve solusyon jetinin yüzey yük yoğunluğunu artırmak için ilave edilerek ısıtıcı manyetik karıştırıcıda bir saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra çözelti, oda sıcaklığında üstü kapalı bir şekilde soğumaya bırakılmıştır. TPU çözeltisi hazırlandıktan sonra bir gün bekletilmiştir.

Elektro-eğirme işleminin deney parametreleri Çizelge 4'de sunulmuştur. Buna göre, altlık ağırlığı 380x200 mm ebatlardaki mikrofiltrelerin ağırlığını, konsantrasyon yüzdesi TPU'nun ağırlıkça oranını,  $\beta$  polimer besleme debisini, l toplayıcı ile kılcal boru arasındaki mesafeyi, C uygulanan voltaajı, t<sub>e</sub> deney süresini ifade etmektedir.

Çizelge 4. Elektro-eğirme metodunun deney parametreleri

Table 4. The experimental parameters of electro-spinning method

Numune no	Altlık malzemesi	Altlık ağırlığı (g)	$\beta$ (mL/h)	l (m)	C (kV)	t <sub>e</sub> (dak.)
1	PET Spunbond	6.47	3.0	0.21	28	4.8
2	PET Spunbond	6.52	2.8	0.23	32	6.6
3	PET Spunbond	6.51	2.4	0.19	28	7.2
4	PET Spunbond	6.45	2.1	0.21	28	7.8
5	PP Monofilament	1.85	2.5	0.21	28	7.2

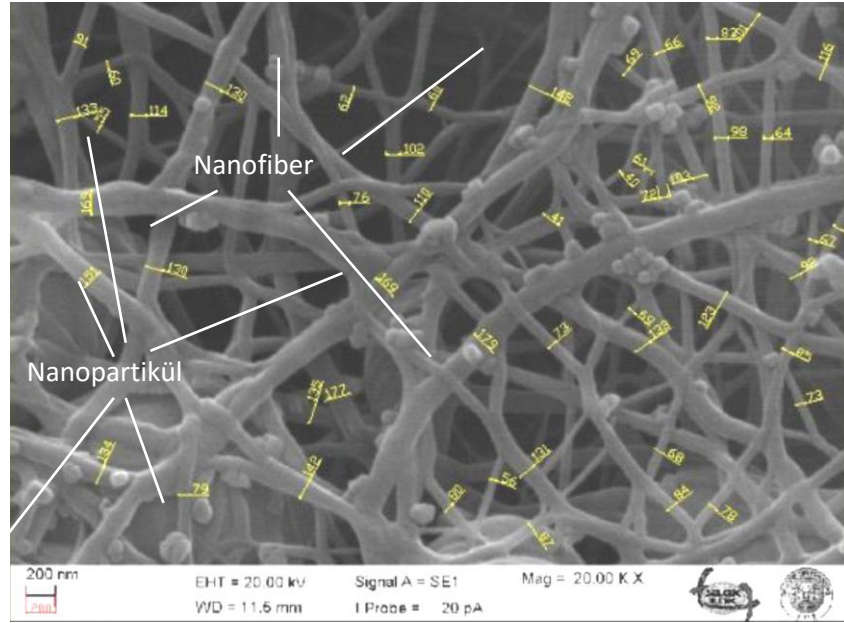
Üçüncü numunenin nanofiber kaplanması için, 380x200 mm ebatlarında ve 6.51g olan PET spunbond filtre altlık, silindirik tamburun üzerine sarılarak izole bant ile yapıştırılmıştır. Daha önce hazırlanan çözeltinin bir kısmı, 50mL'lik bir behere boşaltılarak 25mL'lik şırıngaya çekilmiştir. Şırınga içinde havası alınan çözelti elektro-eğirme deney cihazındaki dozaj pompasına konmuştur. Bu şırıngaya polietilen hortum takılmıştır. Hortumun diğer ucu lülelere bağlı boruya takılarak silindirik toplayıcı ile lüle arasındaki mesafe 19cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Dozaj pompası, 28.8mL/h debiye ayarlanarak çalıştırılmış, böylece çözelti lülelere gönderilmiştir. Deneye başlamadan önce lülelerin ağzındaki çözelti silinerek temizlenmiştir. Deney cihaz kapağı kapatılarak silindirik tambur çalıştırılmıştır. Polimer çözeltisinin lüle ucunda toplanması beklenmiştir. Polimer çözeltisi toplanmaya başladığı anda elektro-eğirme cihazının güç kaynağı çalıştırılmıştır. 10kV ile başlayan gerilme yetersiz geldiğinden Taylor konisi gözlenmemiştir. Manuel olarak yükseltilebilir gerilim, 27kV'a ulaştığında Taylor konisi oluşmaya

başlamış 29kV'da ise eğirme başlamıştır. Bu sırada kronometre çalıştırılmış ve yaklaşık 6 dakika sonra deney cihazı durdurulmuştur. Altı dakikalık süre, dozaj pompasının saatteki debisi ve polimer çözeltisinin yoğunluğundan yola çıkılarak hesaplanmıştır. Altı dakika sonunda, filtre numunesi hassas terazide tartılmış ve 6.68g ağırlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Nanofiber tabaka ağırlığı 0.17g olduğundan numune, silindirik toplayıcıya bağlanmış ve elektro-eğirme işlemi tekrarlanmıştır. Yaklaşık 2 dakika sonunda filtre numunesi tartılmış ve 6.74g ağırlığa sahip olduğu (altılığın nanofiber tabaka ağırlığı 0.23g) tespit edilmiştir. Diğer dört altlık da benzer prosesler uygulanarak nanofiber filtre tabakaları üretilmiştir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

PAN, PVA, PA6 polimer çözeltilerinde kesintili jet oluşması nedeniyle yapılan çalışmalar yarıda kesilmiştir. Düz plakalı ve tek lüleli elektro-eğirme deney cihazı ile homojen nanofiber üretilemediğinden kullanılmamıştır. Yüzey tülünün ve karbon mikrofiber keçenin yeterince rijit olmaması nedeniyle; metal ızgara ise büyük gözenekli olduğundan altlık olarak kullanılmamıştır.

Elektro-eğirme ile nanofibertabaka kaplanan filtrelerin SEM analizi yapılmıştır. Bunun için, nanofiberler 5nm kalınlığında altın nanopartikül kaplanmış ve SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri kullanılarak filtre morfolojisi ile fiber çapları tespit edilmiştir (Şekil 2). Şekil 2'de nanofibertabaka ve üzerindeki nanopartiküller görülmektedir.



**Şekil 2.** 3 g/m<sup>2</sup> ağırlıkta nanofiber tabakalı filtredeki (3. numune) nanofiberlerin boyutları

*Figure 2. 3 g/m<sup>2</sup> weight nanofiber layer filter (3. samples) nanofiber dimension*

SEM analizi sonucu elde edilen görüntüler kullanılarak beş nanofiltre ve H13 sınıfı HEPA filtre numunesinde 50 farklı fiber ölçülmüştür. Daha sonra fiber ölçülerinin aritmetik ortalaması alınarak fiber çapları hesaplanmıştır (Çizelge 5). Çizelgede  $\varnothing_{min}$ .nanofiltrede en küçük fiber çapını,  $\varnothing_{max}$ .en büyük fiber çapını,  $\varnothing_{ort}$ .ortalama fiber çapını ifade etmektedir. Buna göre, elektro-eğirme ile üretilen nanofiberlerin 40-470nm arasında olduğu belirlenmiştir. Standart sapma ise 25-92 nm arasındadır (Çizelge 5).

**Çizelge 5.** PET Spunbond altlık üzerine kaplanan nanofiberlerin boyutları*Table 5. Nanofibers dimensions Which is coated on to the PET spunbond substrates*

Numune No	Filtre ismi	Nanofiber Tabaka Ağırlığı (g/m <sup>2</sup> )	Ø <sub>min</sub> (nm)	Ø <sub>ort</sub> (nm)	Ø <sub>max</sub> (nm)	Standart Sapma
1	Nanofiber tabaka	2	67	200	470	92
2	Nanofiber tabaka	2.5	83	193	321	56
3	Nanofiber tabaka	3	40	98	178	36
4	Nanofiber tabaka	3.2	42	77	169	25
5	Nanofiber tabaka *	4	73	137	279	38

\* PP Monofilament altlık üzerine kaplanmıştır.

Elektro-eğirme ile nanofiber üretiminde literatürle örtüşen sonuçlara ulaşılmıştır. Nitekim Zhang ve diğ., (2009)'nın PA6 ile aynı polimer besleme debisi ve elektriksel gerilimle yaptıkları çalışmada 10 µl/dak.'da 82nm ortalama nanofiber çapı ve 50µl/dak.'da 97 nm ortalama nanofiber boyutu elde etmişlerdir. Düşük polimer besleme debisi ile daha ince ve homojen nanofiberlerin elde edildiğini, artan debiyle polimer jetinin kararsız hale gelmesinden dolayı büyük nanofiberlerin elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca yüksek elektriksel gerilim ve yüksek polimer besleme debisinin aynı anda uygulanmasıyla polimer jetinin kararsız hale geldiğini bunun da boncuk oluşumunu arttırdığını ve nanofiber çap dağılımını genişlettiğini tespit etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada da polimer besleme debisinin artmasıyla büyük çaplı nanofiberler elde edilmiş olup ikinci numunede artan polimer besleme debisi ve elektriksel gerilimin polimer jetini kararsız hale getirerek iri nanofiberlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Birinci ve ikinci numunede kararsız polimer jetinin nanofiber çap dağılımını genişlettiği standart sapma değerinin artmasından anlaşılmıştır (Çizelge 5).

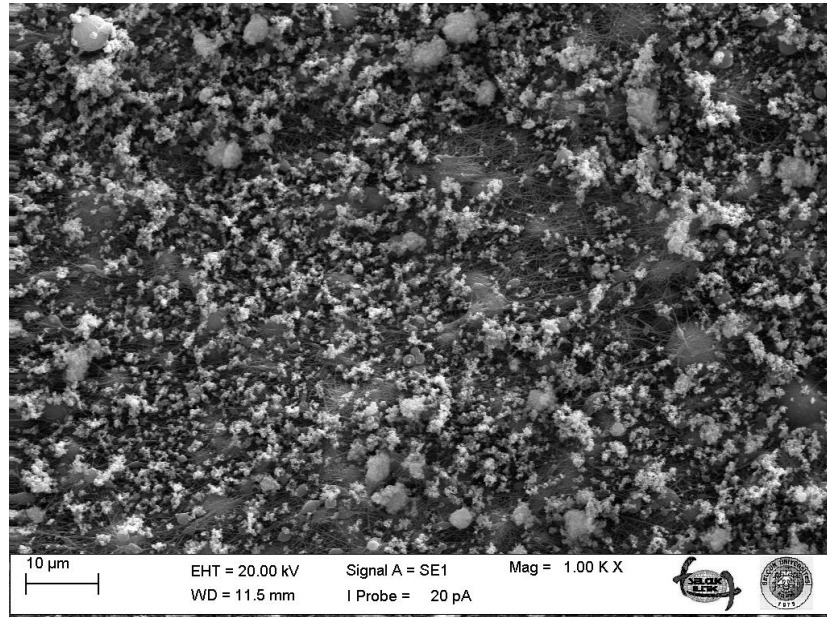
Elektro-eğirme deney parametreleri Çizelge 6'da sunulmuştur. Burada β polimer besleme debisini, lüle-toplayıcı arasındaki mesafeyi, C uygulanan elektrik gerilimini ve Ø<sub>ort</sub> ortalama nanofiber çapını ifade etmektedir. Buna göre en ince nanofiberlerin en düşük polimer besleme debisiyle üretilen dördüncü numunede, en kalın nanofiberlerin ise en büyük polimer besleme debisine sahip birinci numunede olduğu SEM analiziyle tespit edilmiştir. Polimer besleme debisiyle nanofiber çapının orantılı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, nanofiber üretimindeki polimer konsantrasyonun sabit, elektriksel gerilim ile elektro-eğirme mesafesinin aynı veya orantılı olmasıdır.

**Çizelge 6.** PET Spunbond altlığa kaplanan nanofiber tabaka üretimindeki elektro-eğirme deney parametreleri ve elde edilen ortalama nanofiber çapı*Table 6. PET Spunbond substrate coated with the electro-spinning production of nanofiber layer experimental parameters and the obtained average nanofiber diameter*

Numune No	Filtre ismi	Nanofiber tabaka Ağırlığı (g/m <sup>2</sup> )	β (mL/h)	l (cm)	C (kV)	Ø <sub>ort</sub> (nm)
1	Nanofiber tabaka	2	3	21	28	200
2	Nanofiber tabaka	2.5	2.8	23	32	193
3	Nanofiber tabaka	3	2.4	19	28	98
4	Nanofiber tabaka	3.2	2.1	21	28	77
5	Nanofiber tabaka *	4	2.5	21	28	137

\* PP Monofilament altlık üzerine kaplanmıştır.

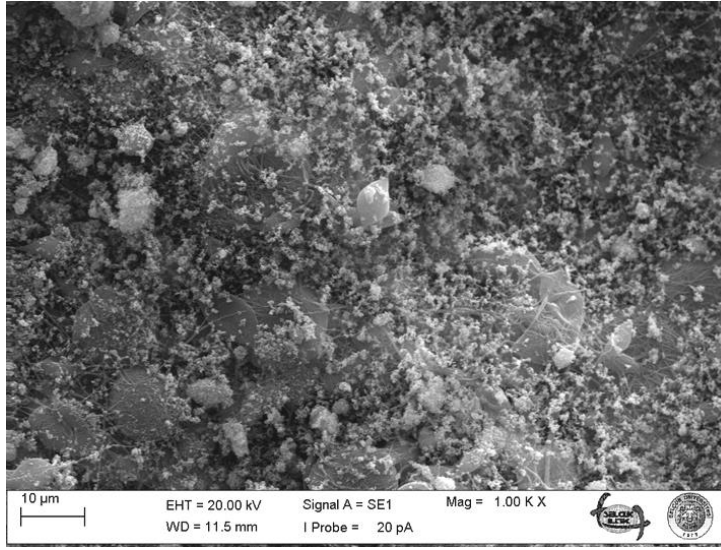
Dördüncü numune ile üçüncü numune aynı konsantrasyon ve elektriksel gerilmede farklı polimer besleme debisi ve elektro-eğirme mesafesinde üretilmiştir. Üçüncü numune üretiminde, dördüncü numuneye göre elektro-eğirme mesafesi 2cm azalmış, polimer besleme debisi 0.3mL/h artmıştır. Mesafenin azalması elektriksel çekim gücünü arttırmış fakat artan debi jeti kararsız hale getirdiğinden üçüncü numunede dördüncü numuneye göre daha büyük boyutta nanofiberler oluşmuştur. Ayrıca mesafenin azalması ve polimer besleme debisinin artmasıyla jet kısa sürede toplayıcıya ulaşmıştır. Bu nedenle yeterince kurumamış fiberler toplayıcıda yapışmıştır. İkinci numune, dördüncü numuneye göre, yüksek elektriksel gerilme, polimer besleme debisi ve elektro-eğirme mesafesinde üretilmiştir. İkinci numunede yüksek elektriksel gerilmeden ve artan polimer debisinden dolayı jet kararsız hale gelmiş ve dördüncü numuneden daha büyük nanofiberler üretilmiştir. Bu çalışmamızda, artan polimer debisi ile elektriksel gerilimin jet kararsızlığının arttığı Şekil 3 ve Şekil 4.a'daki SEM görüntüleri incelenerek görülebilir. Buna göre Şekil 3'de bulunan dördüncü nanofiber tabakadaki boncuklu yapının az olması ve standart sapmasının düşük olması polimer jetinin kararlı olduğunu, Şekil 4.a'daki ikinci nanofiber tabakada büyük miktardaki boncuklu yapılar jetin kararsız olduğunu göstermektedir. Diğer yandan üçüncü numune üretimindeki polimer besleme debisi ve elektriksel gerilimin ikinci nanofiber tabaka üretiminden daha düşük olmasından kararlı bir yapı oluşmuştur (Şekil 4a,b). Nitekim Ramakrishna ve diğ., (2005)'in yaptıkları değerlendirmede, elektriksel gerilimin yüksek olması çözeltinin hızlanmasına böylece daha ince ve boncuksuz fiber üretilmesine olanak sağladığını, fakat polimer besleme debisinin artması ile bunun tam tersi etki oluşturduğunu ifade etmişlerdir.



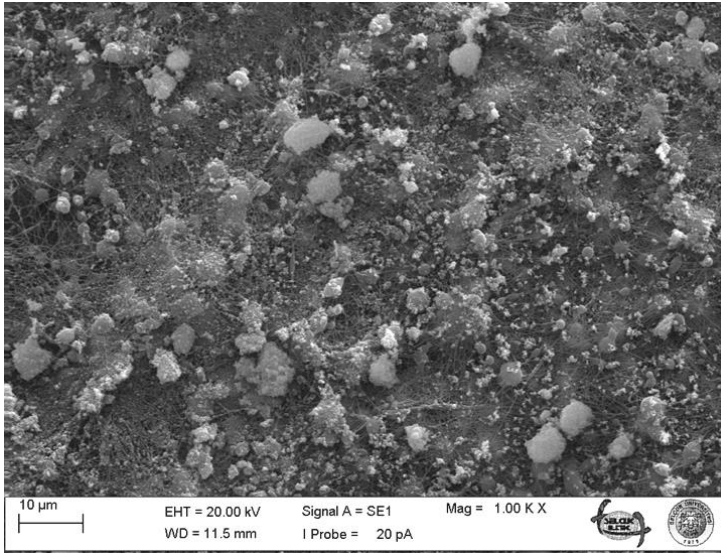
**Şekil 3.** Dördüncü nanofiber filtrenin ( $3,2 \text{ g/m}^2$ ) morfolojisi ve yakaladığı  $\text{CaCO}_3$  nanopartiküller  
*Figure 3. Morphology of fourth nanofiber filter ( $3,2 \text{ g/m}^2$ ) and captured  $\text{CaCO}_3$  nanoparticles*

Dördüncü numune ile birinci ve beşinci numune aynı konsantrasyonda, mesafede ve elektriksel gerilimde üretilmesine rağmen, dördüncü numunenin polimer besleme debisinin her iki numuneden düşük olması daha küçük boyutta nanofiberleri beraberinde getirmiştir.

(Ramakrishna, 2005) yaptıkları çalışmada mesafenin artmasının polimer jetinin havada uçuş süresini arttırdığından daha küçük çaplı fiber oluşacağını ifade etmişlerdir. Fakat yüksek miktarda gerilim ile jetin kararsız hale geleceğini ve bu nedenle boncuk oluşumunda bir artış görülebileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde çalışmamızda ikinci numunede büyük ve çok sayıda boncuklu yapı oluşmuştur (Şekil 4a). İkinci numune üretimindeki deney parametrelerinden polimer besleme debisi, lüle-toplayıcı arasındaki mesafe ve uygulanan gerilim üçüncü numuneye göre artmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 4.** Nanofiber tabakalı filtrelerin morfolojisi ve yakalanan  $\text{CaCO}_3$  nanopartiküller,

(a) ikinci numune ( $2,5 \text{ g/m}^2$ ), (b) üçüncü numune ( $3 \text{ g/m}^2$ )

*Figure 4. Morphology of nanofiber layer filter and capture  $\text{CaCO}_3$  nanoparticles*

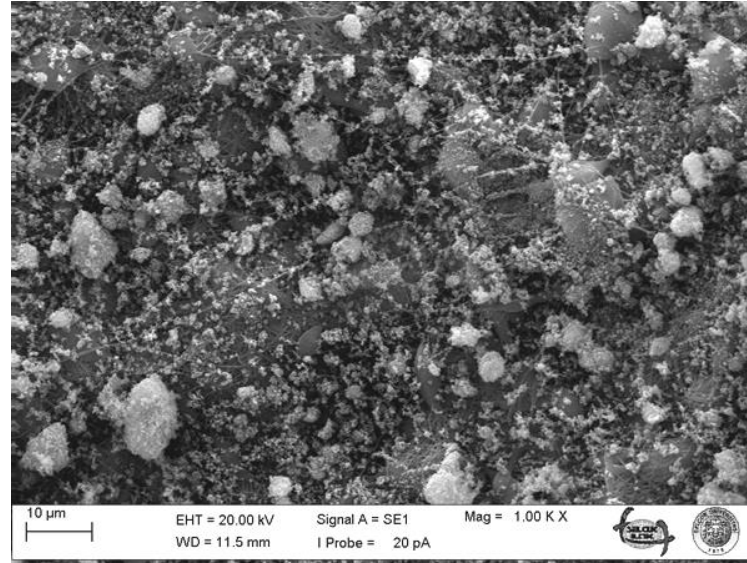
*(a) second specimen ( $2,5 \text{ g/m}^2$ ) (b) thirdth specimen ( $3 \text{ g/m}^2$ )*

Üçüncü nanofiber tabaka üretimindeki mesafenin kısa ve polimer besleme debisinin küçük olması nedeniyle ikinci numuneye göre daha ince nanofiberler elde edilmiştir. Diğer yandan ikinci numune üretiminde elektriksel gerilimin yüksek olması, üçüncü numuneye göre daha büyük boncukları beraberinde getirmiştir (Şekil 4 a,b).

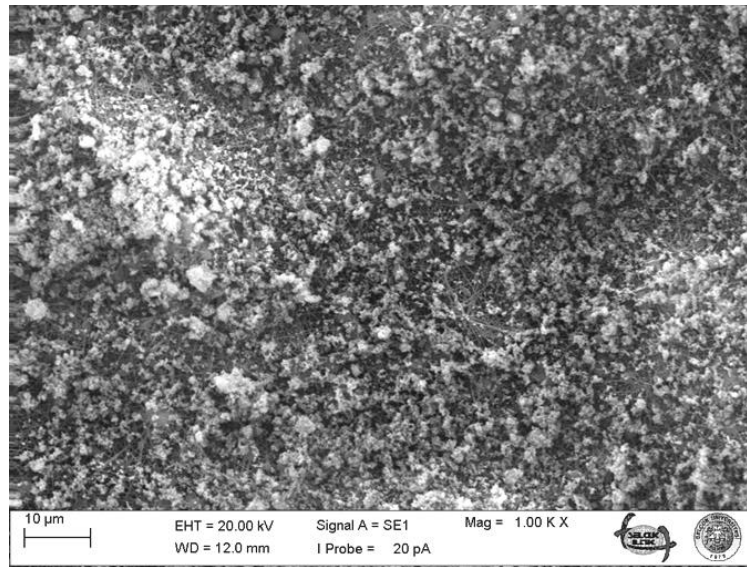
Birinci numune üretimindeki elektro-eğirme deney parametrelerinden polimer besleme debisine lüle-toplayıcı arasındaki mesafe üçüncü numuneye göre artmıştır. Birinci numunenin polimer besleme debisinin fazla olması nedeniyle üçüncü numuneye göre daha büyük nanofiberler elde edilmiştir.

Beşinci numune üretimindeki deney parametrelerinden polimer besleme debisi birinci numuneye göre azalmış, diğer parametreler değişmemiştir. Polimer besleme debisinin azalması, birinci numuneye göre daha küçük fiberlerin ve boncuklu yapının oluşmasına imkân vermiştir (Şekil 5 a,b). Birinci

numunenin polimer besleme debisinin beşinci numuneye göre artmasıyla daha fazla miktarda çözelti toplayıcıya giderek orada katılmış ve nispetendaha büyük boncuklu yapılar oluşmuştur.



(a)



(b)

**Şekil 5.** Nanofiber tabakalı filtrelerin morfolojisi ve yakalanan  $\text{CaCO}_3$  nanopartiküller,

(a) birinci numune ( $2 \text{ g/m}^2$ ), (b) beşinci numune ( $4 \text{ g/m}^2$ )

*Figure 5. The morphology of the nanofiber layer filter and captured  $\text{CaCO}_3$  nanoparticles,*

*(a) first specimen ( $2 \text{ g/m}^2$ ) (b) fifth specimen ( $4 \text{ g/m}^2$ )*

Nanofiberlerden oluşan nanofiltre üretimi için en uygun yöntem elektro-eğirmedir. TPU nanofiber, spunbond ve monofilamentaltlıkların üzerine kolaylıkla kaplanabilmiştir. TPU nanofiber ile spunbond altlıklar uyumlu bir davranış sergilemiş, nanofiber tabaka mikrofiltre yüzeyinden ayrılmadan filtrelemeyi sürdürmüştür.

Bu çalışmada, artan polimer debisi ve elektriksel gerilme ile jet kararsızlığının arttığı görülmüştür. Bu nedenle bilhassa yüksek gerilme ile çalışılmamalıdır. Aksi takdirde yoğun ve büyük boncuklu nanofiber elde edilir. Diğer bir elektro-eğirme deney parametresi olan polimer besleme debisinin



artmasıyla nanofiber çapı büyümüştür. Fakat polimer besleme debisinin kritik bir değerden sonra artması polimer jetini kararsız hale getirmiş ve boncuklanma miktarı ve boncuk boyutları artmıştır. Elektro-eğirmede aynı polimer konsantrasyonunda üretilen nanofiber tabakaları oluşturan nanofiberlerin boyutları birbirine yakın ise tabakaların kalınlığı aynıdır. Birbirine yakın boyuttaki nanofiberlerin tabaka ağırlığı arttıkça tabaka kalınlığı artar, azaldıkça, tabaka kalınlığı azalır. Nanofiber çapı farklı olan tabakalarda böyle bir genelleme yapılamaz. Nanofiber tabaka kalınlığı nanofiber çapına ve tabaka ağırlığına bağlıdır.

#### **Teşekkür (Acknowledgment)**

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi BAP Proje No: 11401130 ile desteklenmiştir.

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Andrady, A.L., 2008, *Science and Technology of Polymer Nanofibers*, Wiley Pres. ,New Jersey, 403 p.
- Anonim, 2012a, <http://www.basf.com/group/corporate/en/literature-document:/Brand+Elastollan+Brochure--Elastollan+Thermoplastic+polyurethane+elastomers+TPU-English.pdf>, [Ziyaret tarihi: 10/11/2012]
- Anonim,2012b, [http://www.merckmillipore.com/chemicals/n-n-dimethylformamideMDA\\_CHEM-103034/p\\_xrOb.s1LJOMAAAEWveAfVhTI?WFSimpleSearch\\_NameOrID=DMF&BackButtonText=search+results](http://www.merckmillipore.com/chemicals/n-n-dimethylformamideMDA_CHEM-103034/p_xrOb.s1LJOMAAAEWveAfVhTI?WFSimpleSearch_NameOrID=DMF&BackButtonText=search+results), [Ziyaret tarihi: 19/11/2012]
- Daşdemir, M., 2006, *Electrospinning of ThermoplasticPolyuretan (TPU) forproducingNanofibers*, M. Sc. Thesis, Gaziantep University, Graduateschool of Natural &Applied Science, Gaziantep.
- Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D., Becktan, N.C., 2001, "The Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles", *Polymer*, Vol. 42, pp.261–272.
- Demir, M.M., Yılgör, İ., Yılgör, E., Erman, B., 2002,"Electrospinning of Polyurethane Fibers", *Polymer*, Vol. 43(11), pp. 3303-3309.
- Graham, K., Grafe, T., Knauf, P., McDonald, B., 2002, "Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications", Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, USA, 9-12 April 2002.
- Huang, Z.M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S., 2003, "A Review on Polymernanofibers by Electrospinnin Gand the Irapplications in Nanocomposites", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2223–2253.
- Hutten, I.M., 2007, *Handbook of Nonwoven Filter Media*, Elsevier Science & Technology Books, USA.
- Jayaraman, K., Kotaki, M., Zhang, Y., Mo, X., Ramakrishna, S., 2004, "Recent Advances in Polymer Nanofibers", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 4(1-2), pp. 52–65.
- Kataphinan W., 2004, *Electrospinnin gand Potential Applications*, PhD Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, USA.
- Kozanoğlu, G.S., 2006, *Elektrospinning Yöntemiyle Nanofiber Üretim Teknolojisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ko, F., 2004, *NanofiberTechnology: Bridging the Gapbetween Nano and Macro World*, NATO ASI on Nanoengineered Nanofibrous Materials, Kluwer Academic Publishers, Drexel-USA, pp.1-18.
- Ramakrishna, S.,Fujihara, K., Teo, W.E., Lim, T.C., Ma, Z., 2005, *An Introduction to Electrospinnin gand Nanofibers*, World Scientific Publishing Co., Singapore, pp. 1-381.
- Süpüren, G., Kanat, Z.E.,Çay, A.,Kırcı, T., Gülümser, T., Tarakçıoğlu, I., 2007, "Nano Lifler", *Tekstil ve Konfeksiyon*, Vol.2, pp.83-89
- Üstündağ, G.C, 2009, *Electrospinning Yöntemiyle Biyomedikal Kullanıma Yönelik Yüzey Üretimi ve Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Üstündağ, G.C., Karaca, E., 2009, "Poli(Vinil Alkol)/Sodyum Alginat Karışımlarından Elektro Çekim Yöntemi İle Elde Edilen Nanolif Yüzeylerin İncelenmesi", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol. 14(1), pp. 159-172.

Zhang, S., Shim W.,S., Kim, J., 2009, "Design of Ultra-fine non Wovens via Electrospinning of Nylon 6: Spinning Parameters and Filtration Efficiency", Material and Design, Vol. 30, pp. 3659-3666



## SOLUTION TO A PIPELINE SCHEDULING PROBLEM BY USING A MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL

<sup>1</sup>Mehmet Emin BAYSAL, <sup>2</sup>Esra UÇAKTÜRK

<sup>1</sup>Selçuk University, Department of Industrial Engineering, Campus, Selçuklu, Konya, TURKEY

<sup>2</sup>Selçuk University, Department of Industrial Engineering, Campus, Selçuklu, Konya, TURKEY

<sup>1</sup>mebaysal@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>esra9721@gmail.com

(Geliş/Received: 03.05.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.06.2016)

**ABSTRACT:** Pipelines are efficient ways of conveying huge amounts of refined petroleum products to distant points. Different products are pumped successively, in the pipelines without a need of a separator between them. Pipelines should be chosen very carefully based on the pumping sequences, volumes to be conveyed, covering the constraints involved by cutting operational costs and focusing on market demands. The real life problem considered in this study consists of a unidirectional pipe distribution system used for pumping petroleum products between the sources and distribution centers. Problem was stated as a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model and solved by using GAMS software thorough actual data. As a result of the study, an optimal pumping schedule for pipeline operations at a certain period of time is achieved.

**Key Words:** Pipeline scheduling, GAMS, Mixed integer linear programming, Optimization

### Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli İle Bir Boru Hattı Çizelgeleme Probleminin Çözümü

**ÖZ:** Boru hatları büyük miktarlardaki rafine edilmiş petrol ürünlerinin uzak mesafelere taşınmasında ekonomik bir yoldur. Boru hatlarında farklı ürünler aralarında herhangi bir ayırıcı olmadan arka arkaya pompalanmaktadır. Pompaj hareketinin sırası ve uzunluğu, boru hattı operasyonel maliyetlerini azaltarak kısıtları karşılamak ve pazar taleplerine cevap vermek için dikkatli bir şekilde seçilmek zorundadır. Bu çalışmada ele alınan gerçek hayat problemi, kaynak ve dağıtım merkezleri arasında yakıt türlerinin pompalanmasında kullanılan ve tek yönlü boru hattından oluşan bir dağıtım sistemini içermektedir. Problem mevcut veriler doğrultusunda Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama modeli olarak ifade edilmiş ve GAMS yazılımı ile çözülmüştür. Çalışma neticesinde belirli bir zaman dilimindeki boru hattı operasyonlarını içeren optimal bir pompaj çizelgesi elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boru hattı çizelgeleme, GAMS, Karma tamsayılı doğrusal programlama, Optimizasyon

## INTRODUCTION

It is known that with the rapid globalization the world experiences, it has become a necessity that the countries rich with natural resources are connected with the resource demanding centers through various transporting means and especially through pipelines. This is so because, in comparison with

other transporting means like land and sea transportation, the transportation through pipelines imposes relatively higher investment costs, however, it is faster, safer and more economic to operate and it pays back in short time.

Just as it is in many other countries, in our country importance has also been given to pipeline transportation of natural resources. Due to its geographical location, Turkey acts as a bridge connecting the Middle East, (where 67% of the world's petroleum reserves are found) and Middle Asian countries (where 40% of the world's natural gas reserves exist) with Europe. It is for this reason that crude oil and natural gases' international transporting pipelines passing through Turkey are expected to increase (Yılmaz, 2005).

Structural-wise, pipelines are classified into three categories. These are non-branched plain pipelines, tree type branched pipelines and network type pipelines that allow the products to be delivered through various delivering points (MirHassani, 2011).

In this study, pumping scheduling of an existing pipeline is explained. Such scheduling has been generally, conducted based on experience, taking no account of the numerical evaluation of the pumping sequence or volumes of the existing pipelines. Costs involved are not considered either. For this reason, after collecting data on pipeline pumping, the MILP model as recommended by Cafaro and Cerdá in 2004 was taken as the basis for an optimum scheduling for this study (Cafaro and Cerdá, 2004).

The other sections of the study are arranged as explained hereunder: Literature review of latest studies conducted on pipeline scheduling is presented in the second section. The third section describes the problem definition. The fourth section presents mathematical model used for the solution of the problem and related data explained. In the fifth and last section of this study the results obtained are explained.

## LITERATURE REVIEW

Pipelines have been widely used over the past 40 years. Regardless of the higher investment costs involved in setting up a pipeline transportation system, its operational costs are relatively lower than the other means of transportation. As the price of the transported product depends on the transporting expenses, it is important that the transporting process becomes worthwhile. That's why over the past 30 years' focus has been on pipelines scheduling problems (Herrán et al., 2012).

Pipeline scheduling for every pumping station is a sequential specification of parties to be injected into the pipeline. The party is defined as a product in a certain quality and quantity. The parties are pumped at certain flow rates. Then division is made throughout the pipeline to reach different delivery points.

The main feature of pipeline transportation is the advancement of the parties through the pipes. Every party pushes another party pumped previously and the process advances in this way. Among the activities done periodically, is the preparation of an applicable likely schedule within a given time interval in order to cover the demands. The target is to obtain sequences of different parties injected into the line by fulfilling the constraints in order to cover the demands. Demands are the essential data in pipeline scheduling. Due to the fact that a certain portion of mixing occurs during pumping of successive parties, some party sequencing is not needed. When the costs incurred in refining these parties in subsequent stages are taken into account, those sequences are completely prohibited. Other aspects that require consideration when performing scheduling are as follows:

- The products should be delivered at a correct amount and time in order to fulfill the customer's demands.
- That the storage capacity of the system is limited.
- The pump stations can operate at the maximum and minimum flow rates of the pipeline set up.
- The pipelines operate together with other means bulky of transport. That is why their stock levels and product demands should be considered.
- Service periods should be taken into consideration (Álvaro and Arreche, 2006).

The most important function of the multi-product pipeline systems is to deliver the products to the required points by minimizing transportation costs and other expenses. Product party can either be injected into the line or discharged into a tank. The system either should fulfill operational constraints such as product transfer, amount, minimum and maximum flow rates etc. Besides this, care should be taken as prohibited product sequence may occur in the pipeline. The system should check the stock levels in the tanks and meet customer's product needs. The aim is to minimize operational, pumping and transferring costs involved with the storage tanks and refinery. Before the end of the planning period, the amount of product injections at the starting point, their sequence and timing should be chosen correctly in order to meet the product demands at the terminals with minimum total expenses. Pumping, reprocessing of the mix and stock expenses should be taken into consideration (MirHassani, 2011).

Pipeline scheduling aims at minimizing operational costs of the pipeline systems; improve the knowledge given to the transporter about the product transfer, benefitting from the available advantages in the time varying energy expenses for power consumption of the pumps (Cafaro and Cerdá, 2004).

The works regarding this topic that have been published in recent years can be summarized into two groups; the type of the pipeline systems (single line system and pipeline networks) and the techniques used in the system (classic, heuristic or hybrid methods).

Sasikumar et al. established a pumping scheduling for products distribution by applying a single source multi-delivery-point pipeline system. They recommended a data base heuristic search technique for a solution. In this intuitional approach, they considered things like availability of the product, meeting demands, stock constraints and other logical pipeline operational constraints (Sasikumar et al., 1997).

Rejowski and Pinto, conducted a study where a petroleum refinery, multi-product pipeline and a system formed of tanks associated with local consumer markets were considered. With the tanks, they developed a wide calibrated (MILP) model for the system's synchronized optimization. The model was formed on the basis of convex-hull formulation (Rejowski and Pinto, 2002).

The tanks had to cover the local consumer's market needs. The researchers used a discrete time approach in their study. They recommended two different mathematical models for the same problem. The first model consists of parties with equal volumetric capacities; whereas in the second model, this assumption was neglected. Cafaro and Cerdá, recommended a steady state approach for transportation of refined products from one refinery to several distribution terminals with a single pipeline. They also recommended a steady state MILP formulation for optimal scheduling of multi products pipeline systems. Neither did this formulation use a discrete time approach nor was the pipeline divided into several parties for the same product. They demonstrated their approach on two real time applications presented by Rejowski and Pinto (Rejowski and Pinto, 2003; Cafaro and Cerdá, 2004).

In their study, Neuro and Pinto modeled crude oil supplying chains containing multi pipelines. Nodes of these chains were suppliers that maintain the whole flow of the product, distribution centers and refineries. They used the process to obtain a wide scaled Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP) model that would represent a complex topology. They recommended a discretization technique that would lessen calculation load for a solution. They also targeted to improve the effectiveness of the MILP model presented by Rejowski and Pinto. They added constraints to the original MILP model that would minimize product disturbances in the pipeline. They then evaluated the model in terms of its performance and quality of the solution (Rejowski and Pinto, 2003; Rejowski and Pinto, 2004; Neuro and Pinto, 2004).

Magatão et al., investigated a problem that contains short term scheduling activities of a certain pipeline connecting a port to a refinery. Throughout the limited scheduling time, they formed pipeline operations presenting low cost operational procedures with the encountered operational requisites simultaneously. They established the main model based on the combined CLP-MILP approaches (Magatão et al., 2005).

Rejowski and Pinto, developed a hydraulic formulation for pipeline scheduling. In their MINLP based study, they completed synchronous multi-product pipeline scheduling and hydraulic operations. With this new MINLP approach, they obtained better objective function values and more exact results than with the previous MILP approach presented by Rejowski and Pinto (Rejowski and Pinto, 2003; Rejowski and Pinto, 2005).

In another study by Relvas et al., a decision support tool constructed on the basis of MILP model was developed. They connected the pipeline operations with the distribution center control at the end of the pipeline. The model is based on steady state principles in terms of time and quantity. They used Standard branch-boundary techniques to obtain the solution. Their study was essentially based on the work of Cafaro and Cerdá. They also recommended steady state MILP model (Cafaro and Cerdá, 2004; Relvas et al., 2006).

Maruyama et al., accomplished a simulation model for decision making scheduling activities of a networks pipeline system. They used the proposed simulation model together with short term scheduling optimization packages. They did this on the EXTEND software by making use of the discrete event simulation model. Each event conveys information about flow rate, quantity, course and type of every transferred product that characterize different parties (Maruyama et al., 2007).

Relvas et al., focused on time and quantity MILP model in order to complete multi product pipeline operations. This model not only defined the first scheduling but also considered the dynamic nature of the operations on the rescheduling (Relvas et al., 2007).

Cafaro and Cerdá, presented a steady time MILP structure for dynamic scheduling of pipelines on a planning period. The redirected deliveries and time dependent product demands on the distribution terminals were supposed to upgrade the pipeline operations continuously. Initially, work was conducted on multi-functional scheduling of a unidirectional pipeline system with a single entry point and a number of exit points amounting to the distribution terminals along the line (Cafaro and Cerdá, 2008).

Mirhassani and Ghorbanalizadeh, developed an integer programming formulation for pipeline scheduling problems. The aim was to explain functions with the number of mixtures. They investigated arrangement of minimum number of mixes with pumping schedules (Mirhassani and Ghorbanalizadeh, 2008).

In a study by Moura et al., the problem of scheduling all pumping operations in order to cover market demands and store planned products was defined. Every pumping commencement and delivery tanks, pipeline course, starting and finishing time, specific products and their quantities were defined by specific details. The basic target beside proper usage of stock and production in order to cover all local demands was to find a solution in terms of physical and operational constraints of the networks (Moura et al., 2008).

Rejowski and Pinto, recommended a steady time based MINLP formulation for scheduling of multi-product pipeline systems that were supposed to cover a diverse range of consumer markets (Rejowski and Pinto, 2003). This MINLP formulation was based on MILP formulation proposed by Rejowski and Pinto (Rejowski and Pinto, 2004). The hydraulic factors and pumping efficiency were taken into consideration. The proposed study was compared with the study involving discrete time by Rejowski and Pinto, and better results were obtained. Effects of number of time intervals that represent the transfer operations were considered several establishments were tested for pushing stations (Rejowski and Pinto, 2008).

Relvas et al., conducted a study focusing on developing a MILP model that defines fuel distribution through a pipeline connecting a refinery to a tank ranch. In order to achieve fuel supply, they created an interaction between the inner constraints on the tank ranch and the pipeline scheduling (Relvas et al., 2008).

In another study by Relvas et al., the researchers worked on a system composed of a single pipeline connecting a refinery to a distribution center. They found that it was necessary to define a suitable product sequence so that they could develop the model performance. They also used an integrated

intuitional algorithm in order to set some multi-purpose tank operational modes. Here, they presented a scheduling decision whereby solution based mathematical modeling and simulation were used together (Relvas et al., 2009).

Cafaro and Cerdá developed a MILP formulation for a unidirectional pipeline network that allows synchronized party injection at several terminals and multi-source operational planning. They significantly decreased the total time necessary for distribution of the products in the stocks in order to cover the demands by making proper use of the pipeline carrying capacities (Cafaro and Cerdá, 2009).

By using a mathematical model that provides progresses under economic target functions, Relvas et al., defined a multi-product pipeline scheduling and stock management at the terminals (Relvas et al., 2009).

Cafaro et al., presented a discrete event simulation system developed on ARENA software for a detailed schedule of a multi-product pipeline system which connects a single entry station to several receiving terminals. They easily managed the pipeline operations with the proposed simulation technique by combining it with optimization tools (Cafaro et al., 2010).

Cafaro and Cerdá, studied pipeline networks formed of one of the bidirectional stations having multi-entry and multiple terminals. In these pipelines, various pumping operations can be carried out simultaneously on different sources. They defined the MILP steady state formulation. The aim in this problem was to accomplish the tank needs with minimum total expenses possible. Scheduling of the pumping and delivery operations was executed at the same time. The results had shown that synchronous party injections offer optimum usage of the pipeline transferring capacity and substantially decrease the time necessary for covering the storage needs (Cafaro and Cerdá, 2010).

The study by Herrán et al., recommended a new mathematical approach to be used in solving problems of more complex multi-pipeline systems' short term operational planning where the system consists of connecting multi-product pipelines together. The researchers developed a MILP model. In order to achieve an optimal plan, they minimize the criteria used such as pumping and start/stop expenses, mixing losses and stock carrying costs. They also monitored the stock level throughout the planning period so that they could keep the stock level on every node at allowable interval (Herrán et al., 2010).

An optimum structure that would help with decision making on multi-product pipeline scheduling in operational activities was recommended in the study conducted by Neves et al. Discretization technique was used in this study. The technique was developed in two different MILP models as lower and main pipeline scheduling problems. In the MILP sequencing model (the main model), the researchers defined the volume and pumping sequence of each party. By using these results in the detailed MILP model (lower model), they could obtain the whole schedule (Neves et al., 2010).

Relvas et al., presented a MILP model formed of flexible storage tanks and that could be connected with the other process models in the system. The main system in the publication was in a chemistry institution or stock tank farmstead that could be located at a supplier chain point. To achieve this system, scheduling of the storage activities on the tank farmstead was to be defined (Relvas et al., 2010).

In a published study by Cafaro et al., the researchers employed optimization and step function simulation methods in order to achieve detailed scheduling of a single source pipeline system (Cafaro et al., 2011).

Then, to solve this transferring problem, Herrán et al. recommended a global finding meta-intuitional algorithm (Herrán et al., 2012).

Mirhassani and Ghorbanalizadeh, defined a short term scheduling for distribution of petroleum derivatives from a single refinery to several storage tanks through tree-shaped pipeline. They presented a steady state MILP formulation for the tree-shaped pipelines (Mirhassani and Ghorbanalizadeh, 2011).

## PROBLEM DEFINITION

The problem consists of a distribution system where a one directional pipeline is used for pumping fuel derivatives between a refinery and distribution centers. The aim is obtain a pipeline scheduling that forms pipeline operations at certain suitable time intervals. For solution to the problem, the followings were involved:

Number of tanks; setting up pipeline for refined petroleum products to be contained within gaps between every tank and refinery, capacity and every tank is capable of containing the products delivered, product demands on every distribution terminal at the end of scheduling period, party sequencing along the pipeline and their initial quantities, initial product stocks, allowable maximum/minimum product levels, maximum values of party pumping ratio, product supply ratio from the pipeline to the tanks and products supply ratio from the tanks to the local markets; scheduling period prohibited P2.(P3), P3.(P2), P3.(P4), P4.(P3) products to be supplied into the line one after the other. They are given in Tables 1,2 and 3 respectively.

**Table 1.** Stock costs on the tanks

Product type	Stock expense (TL/ m <sup>3</sup> h)							
	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
P1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
P2	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
P3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
P4	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

**Table 2.** Initial product quantities in the tanks and max./min stock levels

		TANKS (x 10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> )							
Product Type	level	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
P1	Minimum	90	90	90	90	90	90	90	90
	Maximum	400	400	400	400	400	400	400	400
	Initial	190	230	200	240	190	200	220	230
P2	Minimum	90	90	90	90	90	90	90	90
	Maximum	400	400	400	400	400	400	400	400
	Initial	180	210	180	180	180	190	180	195
P3	Minimum	10	10	10	10	10	0	0	0
	Maximum	70	70	70	70	70	0	0	0
	Initial	50	65	60	60	60	0	0	0
P4	Minimum	90	90	90	90	90	0	0	0
	Maximum	400	400	400	400	400	0	0	0
	Initial	120	140	190	190	170	0	0	0
Shelf gap.(x10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> )		100	200	300	400	475	550	650	700

**Table 3.** Product demands in the tanks and pumping costs

		TANKS(x 10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> )							
Product Type	Level	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
P1	Demand	110	110	120	110	150	150	140	100
	Pumping Costs (TL/m <sup>3</sup> h)	6	7	9	11	13	13.5	14	14.5
P2	Demand	60	80	100	70	100	100	80	90
	Pumping Costs (TL/m <sup>3</sup> h)	6.2	8.2	10.2	11.4	12.6	13	14	14.2
P3	Demand	70	30	40	0	20	0	0	0
	Pumping Costs (TL/m <sup>3</sup> h)	8.6	9.4	11.6	12.8	13.8	14	15	15.2
P4	Demand	50	40	50	70	60	0	0	0
	Pumping Costs (TL/m <sup>3</sup> h)	7.4	8.4	10.4	11.2	12	13	13.4	14

The problem targets to determine optimal sequence, initial quantities and types of products of new party injections assigned to every pipeline. The aim is to meet the product demands, keep the stocks levels in the refinery and storage tanks at allowable intervals all the time and minimize the pumping and stocking costs. Meanwhile; beside the changes in the stock levels in the refinery and storage tanks, when the old and new parties move along the pipelines their changes in sizes and coordinates are monitored throughout the time interval. At the beginning S1, S2, S3, S4, S5 and S6 parties were in the pipeline. These parties, respectively, contained P1, P2, P1, P2, P1 and P2 products and were at these respective quantities 7000, 8500, 10000, 17500, 17000 and 10000 m3. The length of the planning term was 75 hours. Pumping ratio of the products to the pipeline was at the range of 400-500 m3/h while their pumping ratio from the pipeline to the storage tanks was 500 m3 / h.

**MATHEMATICAL MODEL**

*Objective Function:*

Pumping costs and operational holding costs constitutes objective function.

$$minZ = \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \left( cp_{p,j} \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I^{new}} DV_{p,i,j}^{i'} \right) + \frac{1}{scheduling(I^{new})} \sum_{p \in P} \left[ \sum_{j \in J_p} cid_{p,j} \left( \sum_{i' \in I^{new}} ID_{p,j}^{i'} \right) \right]$$

*Constraints:*

*Party sequencing constraint:* Injection of a new party into pipeline can never start before the pumping of the previous party ends

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} \quad \forall i \in I^{new} \quad p, p' \in P \tag{1}$$

$$L_i \leq C_i \leq h_{max} \quad \forall i \in I^{new} \tag{2}$$

Where; C<sub>i</sub> is the finishing time of the new party, L<sub>i</sub> is pumping time and h<sub>max</sub> is the horizon of the scheduling period. Chronologically, (i-1) ∈ I, is pumped before the i ∈ I<sup>new</sup>. For this reason, (i - 1) ∈ I is farther with respect to the starting point.

*Relationship between the quantity of a new party and its length:* The amount of a new party (i ∈ I) pumped into the pipeline should be in a suitable interval.

$$vb_{min} L_i \leq Q_i \leq vb_{max} L_i \quad \forall i \in I^{new} \tag{3}$$

The length of the pumping time of the new party ( $i \in I^{new}$ ), must be higher than a certain maximum pumping time and lower than the minimum pumping time ( $\sum_{p \in P} y_{i,p}=1$ )

$$\left(\sum_{p \in P} y_{i,p}\right) l_{\min} \leq L_i \leq \left(\sum_{p \in P} y_{i,p}\right) l_{\max} \quad \forall i \in I^{new} \tag{4}$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \tag{5}$$

*Mixing materials between successive parties:*  $(i - 1) \in I$  is pumped into the pipeline before the  $i \in I^{new}$ . Therefore; the mixing quantity of the two close parties must be lower than the mixing quantity,  $IF_{p,p'}$  between the  $p$  and  $p'$  products.  $(i-1)$  and  $i$  respectively contain  $p'$  and  $p$  products.

$$WIF_{i,p,p'} \geq IF_{p,p'}(y_{i-1,p'} + y_{i,p} - 1) \quad \forall i \in I \quad i > 1, \quad p, p' \in P \tag{6}$$

*Prohibited Sequence:* Due to products pollution, some product sequencing is not allowed into the pipeline. For two  $p$  and  $p'$  prohibited products, the following constraint is added to the problem. This mixing quantity will not be transferred to the storage tanks. It will be kept in the line up to the storage tank it reaches; and from there, it will be drawn back and subjected to the process again (Rejowski and Pinto, 2002). Otherwise; it may lead to high product losses.

$$y_{i-1,p} + y_{i,p'} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \tag{7}$$

The highest and lowest pipeline coordinates of  $I'$  ( $i \in I$ ) party at time  $(C_{i'})$ .  $F_i^{i'}$ ,  $i$  is the volumetric coordinate of  $i$ th ( $i \in I$ ) party at finishing time  $(C_{i'})$  of the  $i$ th party's ( $i' \in I^{new}$ ) pumping ( $i' \geq i$ ). At  $(C_{i'})$  time,  $F_i^{i'}$  equals the total of the quantity of the farthest coordinate  $(i + 1) \in I$ , of the  $(i+1)$  th party and the  $i$ th party. Because  $(i + 1)$  and  $i$  parties move one after the other, the mixing quantity between the parties is within the  $(i + 1)$ th party.

$$F_{i+1}^{i'} + W_i^{i'} = F_i^{i'} \quad \forall i \in I, \quad \forall i' \in I^{new} \quad i' \geq i \tag{8}$$

*Quantity transferred to the tanks when pumping of the  $i$ th party ( $i \in I^{new}$ ) continues:*

$$Q_i = W_i^i + \sum_{j \in J} D_{i,j}^i \quad \forall i \in I^{new} \tag{9}$$

$W_i^i$ , Is the quantity of  $i$ th party ( $i \in I^{new}$ ) at the end of pumping time.  $Q_i$ , is the initial amount of the  $i$ th party, while  $(Q_i - W_i^i)$ , refers to the amount of  $i$ th party transferred to the storage tanks. The quantity of  $i \in I$  party transferred to storage tanks when pumping of the next  $i' \in I^{new}$  party is in process. The difference between  $i$ th party ( $i \in I$ ) at time  $C_i$  and that at time  $C_{i-1}$  is equal to the amount of  $i$ th party ( $i' \in I^{new}$ ) injected into the storage tanks.

$$W_i^{i'} = W_i^{i'-1} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \tag{10}$$

*Conditions necessary for the transfer from the parties on the pipeline to the storage tanks:* The transfer of product,  $p$  carried by the  $i$ th party ( $i \in I$ ), to  $j$ th storage tank that needs the product is only possible if the  $i$ th party has reached the  $j$ th tank. To achieve this; The sub-coordinate of the  $i$ th party at the end of pumping time of  $(i'-1)$  th party must be less than storage tank coordinate. The difference between the  $i$ th party's farthest coordinate at the end of pumping time of  $(i')$  th party and the quantity of mixture should be lower than the storage tank coordinate.



$$F_i^{i'} - \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P, p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \geq \sigma_j x_{i,j}^{i'} \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i, \forall j \in J \quad (11)$$

When the  $i$ th party reaches  $j$ th storage tank,  $x_{i,j}^{i'} = 1$ ; otherwise, it is 0 and no product transfer takes place from  $i$ th party to  $j$ th storage tank. If the maximum amount to be transferred from  $i$ th party to  $j$ th storage tank is indicated with  $D_{max}$ , then;

$$D_{i,j}^{i'} \leq D_{max} x_{i,j}^{i'} \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (12)$$

The amount transferred from  $i$ th party to  $j$ th storage tank during injection of  $i$ th party ( $i' \in I^{new}$ ), cannot exceed the difference of quantity between  $i$ th party and the quantity of mixture at the end of  $(i'-1)$ th pumping time. During pumping of  $i' \in I^{new}$ , the amount limit transferred from  $i \in I$  party to the storage tanks within the time interval of  $(C_{i'} - L_{i'}, C_{i'})$ , cannot exceed the amount of  $i$ th party ready for sales pumped from  $i \in I$  party to the storage tanks when  $i' \in I^{new}$  is being pumped into the pipeline at time  $C_{i'-1}$ .

$$\sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'} \leq W_i^{(i'-1)} - \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P, p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (13)$$

*Total amount in the pipeline during pumping of  $i' \in I^{new}$ :* The total quantity of  $i$ th party transferred into the storage tanks during pumping of ( $i' \in I^{new}$ ) must be equal the amount of  $i$ th party injected into the pipeline.

$$\sum_{i \in I, i \leq i'} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'} = Q_{i'} \forall i' \in I^{new} \quad (14)$$

When a new party  $i' \in I^{new}$  is injected, all the parties along the pipeline move; as a result, the lowest and highest party coordinates increase with time.

$$F_i^{i'} \geq F_i^{i'-1} \forall i \in I, \quad \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (15)$$

*Product assignment:* Every party transferred within the pipeline should contain a single refinery product.

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (16)$$

*Achieving market demands:* The amount of product  $p$  transferred from storage tanks to customers at time interval of  $(C_i, C_{i-1})$  should be delivered at specific pumping ratio. Throughout the scheduling period the total quantity of product  $p$  supplied to the customers from storage tanks ( $j$ ) must satisfy the demands.

$$qm_{p,j}^i \leq (C_i - C_{i-1}) v_m \forall p \in P, \quad \forall j \in J, \quad \forall i \in I^{new} \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I^{new}} qm_{p,j}^i = qd_{p,j} \forall p \in P, \quad \forall j \in J \quad (18)$$

*The amount of product  $p$  injected into the pipeline when  $i \in I^{new}$  is pumped:* If  $i \in I^{new}$   $p$  product is not sent to  $i$ th party, ( $y_{i,p}=0$ ), then no product is drawn from the refinery. Otherwise, the amount of product injected into the pipeline from the refinery tank becomes equal to the initial amount of  $i$ th party.

$$A_{i,p} \leq My_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, \quad \forall p \in P \tag{19}$$

$$\sum_{p \in P} A_{i,p} \leq Q_i \quad \forall i \in I^{new} \tag{20}$$

*Stock levels control of the storage tanks:* If  $Y_{i,p}=1$ , then the  $(i \in I)$  th party carries product  $p$ . If  $Y_{i,p}=0$ , then the amount transferred from  $i$ th party to  $j$ th storage tank within  $(C_{i'} - L_{i'}, C_{i'})$  time interval equal zero.

$$DV_{i,p,j}^{i'} \leq D_{max} Y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, \quad p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new} \tag{21}$$

$$\sum_{p \in P} DV_{i,p,j}^{i'} \leq D_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I^{new} \quad j \in J, i' \in I^{new} \tag{22}$$

*Determining suitable stock intervals:* The stock level of product  $p$  in  $j$  storage tank at time  $C_{i'}$ , is found by adding the amount transferred to storage tanks from  $i$ th party to the stock level existing in time  $C_{i'-1}$  and simultaneously subtracting the amount supplied to the local markets from product  $p$ .

$$ID_{p,j}^{i'} \leq ID_{p,j}^{i'-1} + \sum_{i \in I, i \leq i'} DV_{i,p,j}^{i'} - qm_{p,j}^{i'} \quad p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new} \tag{23}$$

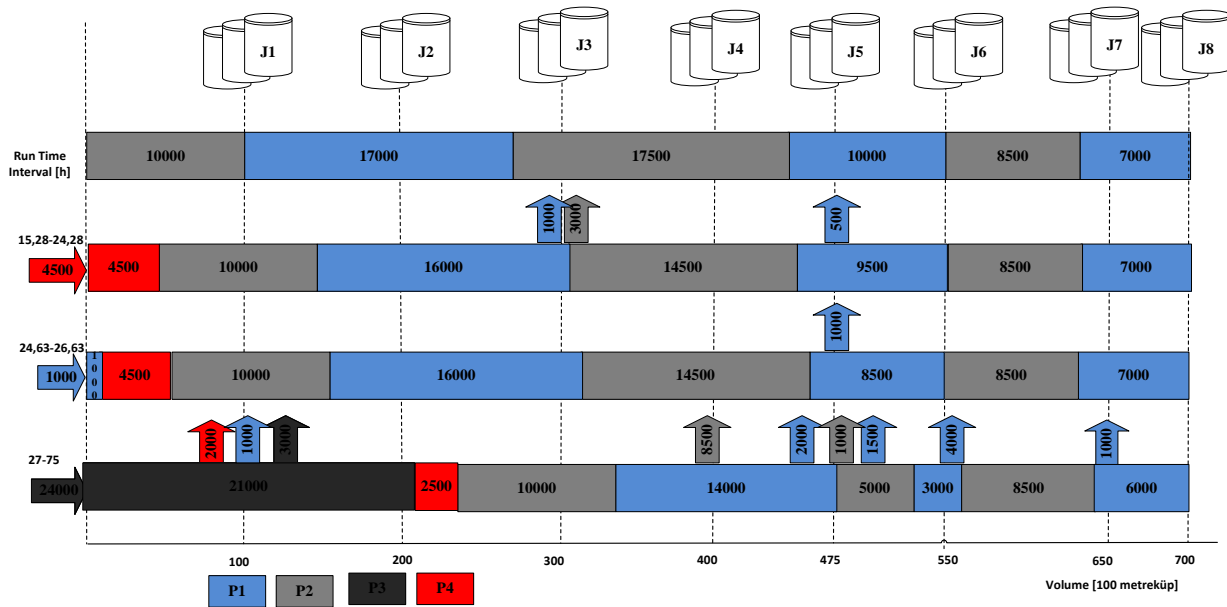
The stock level of product  $p$  in  $j$  tank at time  $C_{i'}$ , should always remain between specific maximum and minimum stock levels of  $ID_{p,j}^{i'}$ .

$$IDmin_{p,j} \leq ID_{p,j}^{i'} \leq IDmax_{p,j} \quad p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new} \tag{24}$$

**RESULTS AND DISCUSSION**

According to the results presented on Figure 1, in order to meet customer demands, three new parties of S7-S8 and S9 having capacities of 4500, 1000 and 24000 m<sup>3</sup> and containing products P4-P1 and P3 respectively, should be injected into the pipeline. At the intervals of 15,28–24,28 hours, S7, 24,63–26,63 hours S8 and between 27–75 hours S9 parties were pumped into the pipeline. First of all, when 4500 m<sup>3</sup> of product P4 was pumped at the intervals of 15,28–24,28 hours, 500 m<sup>3</sup> of product P1 from S3 party was transferred to J5 storage tank, 3000 m<sup>3</sup> of product P2 from S4 party was transferred to storage tank J3, and 1000 m<sup>3</sup> of product P1 from S5 party was transferred to storage tank J3. Then, between 24,63–26,63 hours 1000 m<sup>3</sup> of P1 was being pumped and the same amount of 1000m<sup>3</sup> of P1 was transferred from S3 party to J5 storage tank. Between 27–75 hours, P3 was being injected into the pipeline and 1000 m<sup>3</sup> of P1 product from S1 party was sent to J7 tank, 1500 m<sup>3</sup> of P1 from S3 party was transferred to J5 tank, 4000 m<sup>3</sup> of P1 from S3 party was transferred to J6 tank, 8500 m<sup>3</sup> of P2 product from S4 party was sent to J4 tank, 1000 m<sup>3</sup> of P2 from S4 party was sent to J5 tank, 2000 m<sup>3</sup> of P1 product from S5 party was sent to J5 tank, 2000m<sup>3</sup> of P4 product from S7 party was transferred to J1 storage tank, 1000m<sup>3</sup> of P1 product from S8 party was sent to J1 tank and 3000m<sup>3</sup> of P3 product from S9 party was transferred to J1 storage tank.

The optimum result was found to be 398.940,66.



**Figure 1.** Schematic indication showing results obtained from a mathematical model run on GAMS software

## CONCLUSION

Regardless of the fact that recently a focus has been placed on scheduling problems due to the increasing trend of transferring petroleum products from production centers to consumer areas by using pipelines as the most economic means of transfer, no record of such a study has been conducted in Turkey.

In this study, a mathematical model has been proposed for the purpose of scheduling a fuel distribution system that supplies fuel to strategic points and monitored on the basis of the pipeline requirements and product demands. The system consists of 8 storage tanks located at different areas and a unidirectional pipeline connected to its refinery. 4 different products are found in the pipeline and storage tanks. The aim of the study is present a flexible MILP model that cover pipeline operations run based on expert experience. The model can be used for different situations by changing operating conditions and adding specific constraints depending on the needs at hand. Variations in the coordinates and quantities of the parties within the pipeline that occur as time changes are monitored. Besides achieving product demands, with the model, high pumping, mixing and stock costs have been avoided.

## INDEX

- I : Party series ( $I^{\text{old}} \in I^{\text{new}}$ )
- $I^{\text{old}}$  : Old party series existing in the pipeline at the start of time horizon
- $I^{\text{new}}$  : New party series to be injected into the pipeline during time horizon
- J : Distribution terminals series along the pipeline
- P : Refined petroleum products series

## PARAMETERS

- $cid_{p,j}$  : Unit stock expenses of product p in  $j^{\text{th}}$  storage tank
- $cp_{p,j}$  : Pumping costs of product p from refinery to j storage tank
- $h_{\text{max}}$  : Horizon length
- $ID_{p,j}^o$  : Initial costs of product p in j storage tank
- $IF_{p,p'}$  : Quantity of mixture between parties containing p and  $p'$  products

$l_{\min}/l_{\max}$  : Maximum/minimum pumping time for a new party

$qd_{p,j}$  : Total demand of product p covered in j tank

$v_m$  : Maximum flow rate to the local markets

$v_b$  : Pumping ratio

$v_{b\max}$  : Maximum pumping ratio

$v_{b\min}$  : Minimum pumping ratio

$W_i^o$  : Initial amount of old parties  $i \in I^{old}$

$\sigma_j$  : Volumetric coordinate between start terminal and j storage tanks

#### VARIABLES

$A_{i,p}$  : Product amount injected into pipeline during pumping of  $i^{\text{th}}$  party

$C_i/L_i$  : Ratio of  $i^{\text{th}}$  party's pumping completing time to pumping length  $\forall i \in I^{\text{new}}$

$D_{i,j}^{i'}$  :  $i^{\text{th}}$  amount transferred from pipeline to j storage tank when  $i'^{\text{th}}$  party is injected

$DV_{i,p,j}^{i'}$  : Amount of product p transferred from  $i^{\text{th}}$  party to  $j^{\text{th}}$  storage tank when the  $i'^{\text{th}}$  party is injected

$F_i^{i'}$  : The farthest coordinate of  $i^{\text{th}}$  party from refinery at time  $C_{i'}$

$ID_{p,j}^{i'}$  : Stock level of product p in j storage tank at the time pumping of  $i'^{\text{th}}$  party ends

$Q_i$  : Amount of new i party

$W_i^{i'}$  : Amount of i party at time  $C_{i'}$

$qm_{p,j}^i$  : Amount of p product from the storage tanks sent to customers within  $(C_i - C_{i-1})$  time interval

$WIF_{i,p,p'}$  : Quantity of mixture between i and  $(i-1)$  parties that contain p and  $p'$  products

$y_{i,p}$  : When the  $i^{\text{th}}$  party contains p product, it takes the value of 1

$x_{i,j}^{i'}$  : When  $i^{\text{th}}$  party is transferred to j storage tank during injection of  $i'^{\text{th}}$  party

#### REFERENCES

- Álvaro, G.S., Arreche, L.M., "A Support Decision Tool for Pipeline Scheduling", Third International Conference on Production Research Americas' Region 2006 (ICPR-AM06), Conference Proceeding, Curitiba, Brazil, 2006.
- Cafaro, D. C., Cerda, J., 2004, "Optimal Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems Using a Non-Discrete MILP Formulation", Computers and Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 2053-2068.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2008, "Dynamic Scheduling of Multiproduct Pipelines with Multiple Delivery Due Dates", Computers and Chemical Engineering, Vol. 32, pp.728-753.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2009, "Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Sources", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 48, pp. 6675-6689.
- Cafaro, G.V., Cafaro, D.C., Cerdá, J., Mendes, A.C., "Oil-Derivatives Pipeline Logistics Using Discrete-Event Simulation", Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, Arizona, USA, 2010, pp. 2101-2114.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2010, "Operational Scheduling of Refined Products Pipeline Networks with Simultaneous Batch Injections", Computers and Chemical Engineering, Vol. 34, pp. 1687-1704.
- Cafaro, G.V., Cafaro, D.C., Mendes, A.C., Cerdá, J., 2011, "Detailed Scheduling of Operations in Single-Source Refined Products Pipelines", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 50 (10), pp. 6240-6259.
- Herrán, A., de la Cruz, J. M., de Andrés, B., 2010, "A Mathematical Model for Planning Transportation of Multiple Petroleum Products in A Multi Pipeline System", Computers and Chemical Engineering, Vol. 34, pp. 401-413.

- Herrán, A., de la Cruz, J. M., de Andrés, B., 2012, "Global Search Metaheuristics for Planning Transportation of Multiple Petroleum Products in A Multi-Pipeline System", *Computers and Chemical Engineering* Vol. 37 (2012), pp.248–261
- Magatão, L., Arruda, L. V. R., Nevesxe, F.A., 2005, "Using CLP and MILP for Scheduling Commodities in A Pipeline", *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 20, pp. 1027-1032.
- Maruyama Mori, F., Luders, R., Arruda, L. V. R., Yamamoto, L., Bonacin, M. V.; Polli, H. L., Aires, M. C., Bernardo, L. F. J., 2007, "Simulating The Operational Scheduling of a Real World Pipeline Network", *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 24, pp.691–696.
- MirHassani, S.A., Ghorbanalizadeh, M., 2008, "The Multi-Product Pipeline Scheduling System", *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 56(4), pp. 891–897.
- MirHassani, S.A., Jahromi H.F., 2011, "Scheduling Multi-Product Tree-Structure Pipelines", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.35, pp. 165–176.
- Moura, A.V., de Souza, Cid C., Cire, Andre A., Lopes, Tony M.T., 2008, "Planning and Scheduling the Operation of a Very Large Oil Pipeline Network, Principles and Constrained Programming", *Lecture Notes in Computer Science*, P.J. Stuckey (Ed.), pp. 36-51.
- Neiro, S., Pinto, J. M., 2004, "A General Modeling Framework for The Operational Planning of Petroleum Supply Chains", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 871-896.
- Neves B.S., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D, Neves Jr. F., 2010, "Decomposition Approach for the Operational Scheduling of a Multi-Product Pipeline", *Computer Aided Chemical Engineering* Vol. 28, pp.1207–1212.
- Rejowski R., Pinto, J. M., 2002, "An MILP Formulation for the Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 467-474.
- Rejowski, Jr., R., Pinto, J. M., 2003, "Scheduling of A Multiproduct Pipeline System", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.27, pp. 1229-1246.
- Rejowski, Jr., R., Pinto, J. M., 2004, "Efficient MILP Formulations and Valid Cuts for Multiproduct Pipeline Scheduling", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 1511-1528.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M., 2005, "A Rigorous MINLP for The Simultaneous Scheduling and Operation of Multiproduct Pipeline Systems", *Computer Aided Chemical Engineering* V.20, pp 1063–1068.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M., 2008, "A Novel Continuous Time Representation for The Scheduling of Pipeline Systems with Pumping Yield Rate Constraints", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.19, No. 4, pp. 467-474.
- Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., Fialho, J., Pinheiro, A. S., 2006, "Pipeline Scheduling and Inventory Management of a Multiproduct Distribution Oil System", *Ind.Eng.Chem.Res.*, Vol.45, pp. 7841-7855.
- Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., Matos, H. A., Fialho, J., 2007, "Rescheduling of Medium Term Pipeline Operation with Tank Farm Inventory Management Computer Aided Chemical Engineering Vol.24, pp. 667-773.
- Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Fialho, J., 2008, "Oil Products Pipeline Scheduling with Tank Farm Inventory Management", *Computer Aided Chemical Engineering*, V.25, pp.277–282.
- Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Matos, H.A., 2009, "Heuristic Batch Sequencing on A Multiproduct Oil Distribution System", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 33, pp. 712-730.
- Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Matos, H.A., 2010, "Inventory Management MILP Modeling for Tank Farm Systems", *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol.28, pp.727–732.
- Sasikumar, M., Prakash, P. R., Patil, S. M., and Ramani, S., 1997, "PIPES: A Heuristic Search Model for Pipeline Schedule Generation", *Knowledge-Based Systems*, Vol.10, pp. 169-175.
- Yilmaz, N.F., 2005, "A Survey on Petroleum and Natural Gas Pipelines" *Journal of Installation Engineering*, Vol. 87, pp.4-14.

## DRUG BIT CUTTING TRACE IMAGE COLOURS AND CUTTING FORCE FLUCTUATION RELATION

<sup>1</sup>Mehmet Kemal GÖKAY, <sup>2</sup>Arif Emre DURSUN

<sup>1</sup>Selçuk University, Faculty of Engineering, Mining Engineering Department, Campus, KONYA

<sup>2</sup>Selçuk University, Vocational School of Technical Sciences, Property Protection and Safety, Campus, KONYA

<sup>1</sup>mgokay@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>aedursun@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 16.06.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.09.2016)

**ABSTRACT:** Rock cutting is developing area in mining and tunnelling sectors. In order to open an excavation inside or surface of the rock masses, they should be dig up to obtain required engineered volume. Beside the conventional blasting methods result in total breakage of the selected parts of rock masses, rock cutting machineries are used in some engineering projects which they have cutting bits to trim the rock masses into small chips. Drag bits, as a type, is one of the bit kinds which researchers have analysed for its design parameters for different rock masses. When rock bit cutting performances are under consideration, laboratory cutting tests are performed and rocks are cut with different bit profiles to evaluate its design parameters. In these researches cutting traces have mostly been photographed for test file data. It was realised here in this research and analyzed some of these images for their colour properties. Different coloured sectors were determined along the selected cutting trace images which were compared also with the cutting force records of the related cutting tests. The colour distribution and colour difference areas of the trace images were then analysed with the cutting actions and rock mass features. The resultant enhanced coloured images and cutting forces fluctuation data obtained during cutting tests of drag bits showed that colour analysed can also be the indicators of cutting performance if they are carefully appraised.

**Key Words:** *Rock cutting tests, Cutting traces, Drag bits cutting traces, Colour analyses, Colour analyses of rock cutting trace images.*

### Kama Keskinin Oluşturduğu İzlerdeki Renkler ve Kesme Sırasında Ölçülen Kesme Kuvvetiyle İlişkisi

**ÖZ:** Maden ve tünel kazı aşamalarında, kaya kesme çalışmaları üzerinde araştırma yapılan konular arasındadır. Kayaçların içinde veya üzerinde herhangi bir mühendislik uygulaması için bir boşluk oluşturulacaksa, orada kaya kütesinin parçalara ayrılarak boşaltılması gerekecektir. Kayaçları istenen boyutlara göre tamamen parçalayarak kazılması işlemlerini içeren klasik patlatma-yükleme-taşıma sistemine karşılık kazıcı makinelerin keski uçlarıyla kayayı çentikleyerek sürekli kazması ve otomatik olarak yüklemesine bağlı mekanizasyon sistemleri de geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda kullanılan keski uçlarının hangi kaya kütlelerinde daha verimli olduğunun araştırılması uçların tasarım parametrelerinin belirlenmesinde önemlidir. Bu çalışmalarda, keski izlerinin fotoğrafları veri olarak arşivlenen sonuçlardandır. Bu araştırma kapsamında, kama keski uçlarının kullanıldığı kesme deneylerinde ortaya çıkan keski izleri üzerinde renk analizleri yapılmıştır. Keski izlerinde belirlenen renk öbeklenmeleriyle, bu kesme deneyleri sırasında ölçülen kesme kuvveti değişimleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ölçülen ve grafiği çizilen kesme kuvveti değişimleriyle, keski izlerinde belirlenen renk farklılıklarının belirli ölçüde uyum içinde olduğu ve keski izlerinde belirlenecek renk öbeklenme ve kodlamalarının kesme performansı hakkında fikir verebileceği değerlendirilmiştir.

DOI: 10.15317/Scitech.2016.59

**Anahtar Kelimeler:** Kaya kesme deneyleri, Keski izleri, Kama keski izi, Renk analizi, Keski izlerinde renk analizi.

## INTRODUCTION

Rock cutting machines have been used for many purposes in underground and surface excavation purposes. Types of excavators are varied according to the jobs they have been produced for. Some of them are manufactured for mine gallery (or tunnel) excavations for soft rock materials, some other types might be produced for hard rock excavation environments. There are excavation machines also for coal and soft clay seams for faster mining operations. These machines have been equipped with cutting bits which can be drag, point-attack, disk, roller or button in types. Cutting bits' performances have been explored in last 30 years to produce more effective bits for different rock types. Since rock masses are different in each mining and tunnelling project sites, cutting machines and their projected bits are advised to be analysed in detail before giving any decision about rock cutting operations (Gokay and Dursun, 2013). When cutting tests are concerned, the cutting force and specific energy for selected rock samples should be determined for each rock excavation projects. These parameters are main design parameters which researchers are concentrated on. In these researches, the traces which were created during the rock cutting tests were usually examined for their appearances if they have any clue about the cutting performances. The plain photographs of cutting traces were obtained and filed for test data archives. This has been common application nowadays which engineering firms follow. The study performed here, concentrates on these cutting trace images, photographs. They were analysed by common photographic pixel analysers like Photoshop software program to produce any unseen evidences, clues, on them by naked eyes. It was determined that photographs of the selected drag bit cutting tests have their own colour clues, sectors, for the researchers. Fresh rock-chip fracturing and rock breakage due to existing micro cracks in rock masses have different image properties and they were determined from the trace images after colour enhancement works were performed in this work. Digital colour coding of the drag bit cutting traces and applied cutting force differentiations have then been compared to understand the significance of the detected dissimilar coloured sectors, along these traces.

Performance of the mechanical cutting is highly depending on the cutting bits. There are two main types of cutting bits; drag and disk types. Disk type bits are generally used for full face tunnel excavation machines. Chisel or drag types of bits on the other hand are used at roadheaders, coal ploughs, coal face cutting machines, continuous miners and tunnel excavation equipments. Since drag bits are economic to be produced and in some circumstances, they are good in performance for certain rock cutting conditions, they are preferred to be used more widely. They are made up from tungsten carbide and cobalt allays to get very strong in mechanical behaviour together with high temperature resistance. These two properties are very important in rock cutting. Due to friction between bits and rock surfaces along the cutting traces, working temperatures of bits are risen up to very high levels. Beside, cutting bits are under influence of high stresses during cutting. Because mechanical power supplied by cutting machine is concentrated on a few rock bits to break the rock masses into numerous chips.

According to Roxborough (1973) tungsten carbide and cobalt powder size distribution should be very similar to get high quality cutting bits. Drag bits should also have high impact resistance and high hardness. During raw materials' composition arrangements in drag bit production, if cobalt amount (percentage in the mixture) is decided to be increased the resultant bit hardness is lower, but bit's strength is higher.

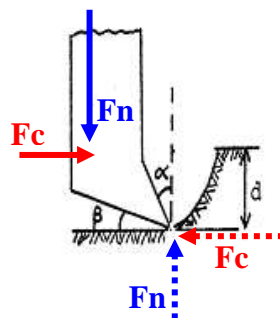
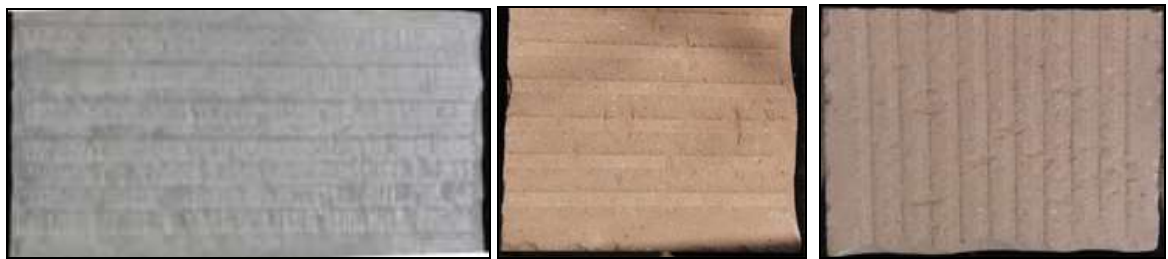


Figure 1. Drag bit's design parameters

In order to obtain hardest cutting bits, cobalt percentage in raw material before their production should be arranged to 10-15%. Cutting performance of the drag bits are also influenced by their shapes and dimensions. Design factors influencing rock cutting performance of the drag bits are shown in Fig.1 and they are: rake angle, ( $\alpha$ ), clearance angle ( $\beta$ ), cutting depth (d), normal force ( $F_n$ ) and shear, cutting, force ( $F_c$ ). When the shape of drag bit is changed with differentiating  $\alpha$  and  $\beta$  angles separately, required cutting force ( $F_c$ ) is also varied for different normal force ( $F_n$ ) conditions. First methodological explanation in mechanics of cutting was given by Merchant (1945). Merchant defined required cutting force ( $F_c$ ) in metallic material cutting operation as a dependable function of shear strength, bit's rake angle, bit's cleaning angle and depth of cut. After almost 40 years later, Evans (1984) produced new approach for coal cutting procedures. Evans preferred to use tensile strength instead of shear strength of coal to calculate required cutting force, ( $F_c$ ). There are a few more approaches to calculate related cutting force, ( $F_c$ ), in these criteria, researchers facilitated the rock cutting test parameters and rock material properties together (Dursun, 2012).



**Figure 2.** Cutting traces obtained on rock slaps during rock cutting tests. Each trace represents separate tests which might be performed to search different cutting parameters

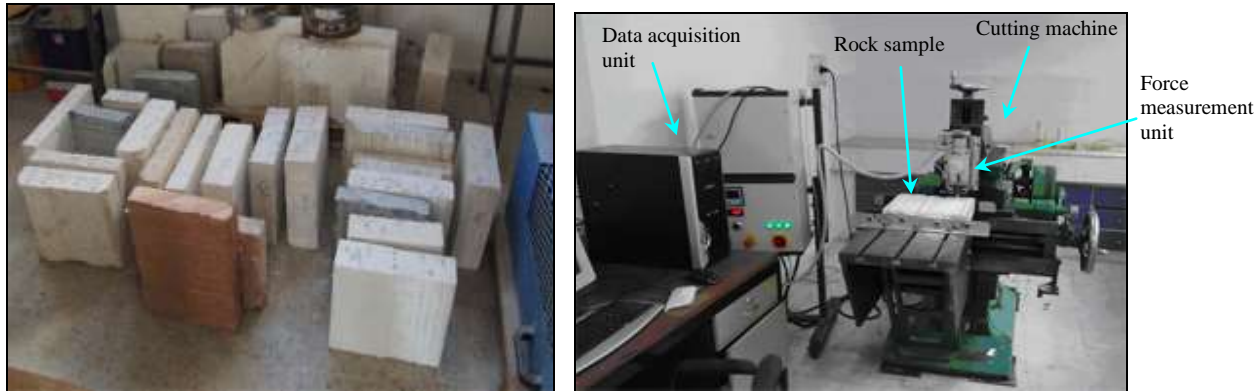
Rock cutting tests have usually been performed in laboratories by especial test apparatus. Beside the main test data, cutting traces on the tested rock surfaces are also the results of these tests and examples of them can be seen in Fig.2. Image colour analyses performed according to colour differences detected along the photographs of cutting traces were main study here. When the photographs of the traces were compared together with the cutting force, ( $F_c$ ), graphics, it is important to point out some categorized features. Colour distributions along each trace were different in characters so colour map obtained of each trace was considered like a fingerprint of that trace. In most of the cases, naked eyes can not recognise all the coloured zones along the cutting traces. Photographic image analyses on the other hand showed that colour differentiation areas which were determined on the selected traces strictly coincided with cutting performance. Rock and coal cutting are mostly performed by drag bits and "fractured hard rock material breakage" or "softer rock material cutting" achievements are detected during the cutting tests which produce selectable colour differences on their cutting traces.

## ROCK CUTTING TEST EQUIPMENT FOR MARBLE SLAPS

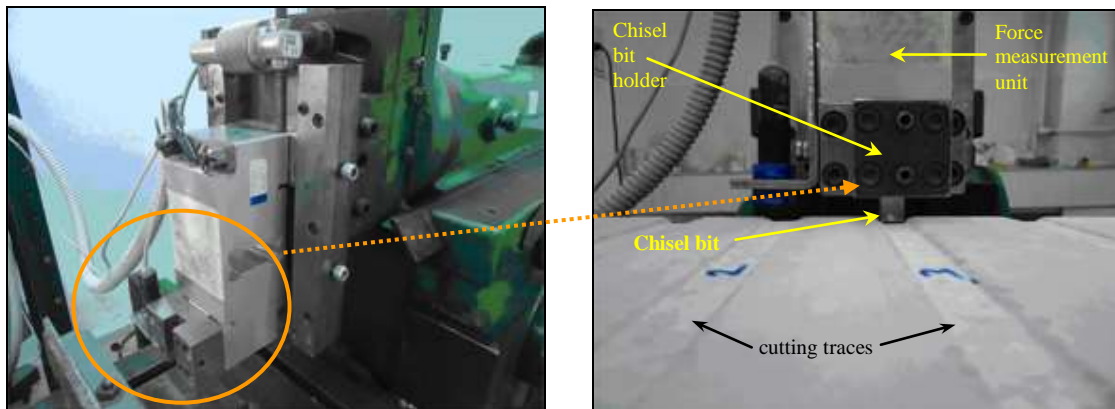
Rock cutting tests in this study were performed by drag bits in Mining Engineering laboratory of Selcuk University (Konya-Turkey) to calculate specific cutting energy for the selected rock samples (Fig.3). Rock cutting research was executed by Dursun (2012) and rock samples were tested one by one for their specific energy calculations. The research was organized according to international standards given by McFeat-Smith and Fowell (1977). This standard describes the small scale cutting test sets. Rock samples were blocked in the laboratory before the cutting tests to suit test equipment (Fig.3 and 4). Rock samples' dimensions were 30x30x10 cm. Tests were repeated for each cutting trace over the selected rock sample surfaces with the same drag bit (rake and clearance angle were unchanged) for the same cutting depth. After attaching drag bit to the test equipment, cutting depth was arranged through test equipment mechanisms. Rock cutting test equipment were then used to apply normal ( $F_n$ ) and cutting



forces ( $F_c$ ) to attached drag bit where these forces had been measured (Fig.4) separately and saved automatically (Fig.3) through force measurement unit.



**Figure 3.** Rock slaps and cutting test equipment used during rock cutting tests (Mining Engineering Department, Selcuk University, Konya, turkey), (Dursun, 2012)



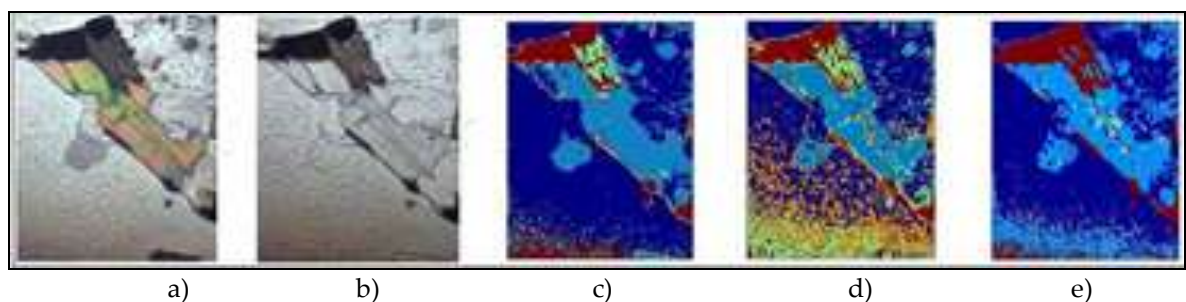
**Figure 4.** Drag bit attached to test equipment and cutting traces obtained during the tests (Dursun, 2012)

Cutting machine shown in Fig.3 was a commonly used metal cutting machine in mechanics warehouses and it was modified for rock cutting test purposes in Selcuk University. This machine was selected because of its high electric motor power (4 kW) and its heavy & strong body structure. It has cutting arm which has a stroke up to 450 mm which is enough to test 300 mm long rock samples. Vibration at cutting machine and its cutting arm were carefully observed during this research for its influences on the performed tests. Since the machine was selected heavy enough for the selected rock samples and selected rock cutting depths were chosen accordingly, machine body vibration was fixed in a minimum level which was not influencing the cutting tests. When the rock samples were put on sample holder plate, this plate was moved with test sample by means of a gear mechanism to get left-right and up-down movements. These movements helped the researchers to arrange predetermined, planned, positions for the tests. Before each cutting test, drag bit horizontal position was arranged for next cutting trace and bit's vertical position was arranged for selected cutting depth. Test equipment used here (Fig.3) had a data acquisition unit which had its own electronic control parts together with computer. These parts were selected especially to suit very short cutting test periods (1-3 sec.). This unit collected test data, 1000 times per second, including; normal force ( $F_n$ ), cutting force ( $F_c$ ), voltage (V) and electric current (A) values. Drag bit used in the tests were attached to cutting machine together with a special attachment (Fig.4). This holder was directly connected to force measuring apparatus. During the tests here, 12.7 mm wide tungsten carbide drag bits were used.

## ROCK COLOURS, TRACE COLOUR SECTORS AND CUTTING FORCE FLUCTUATION

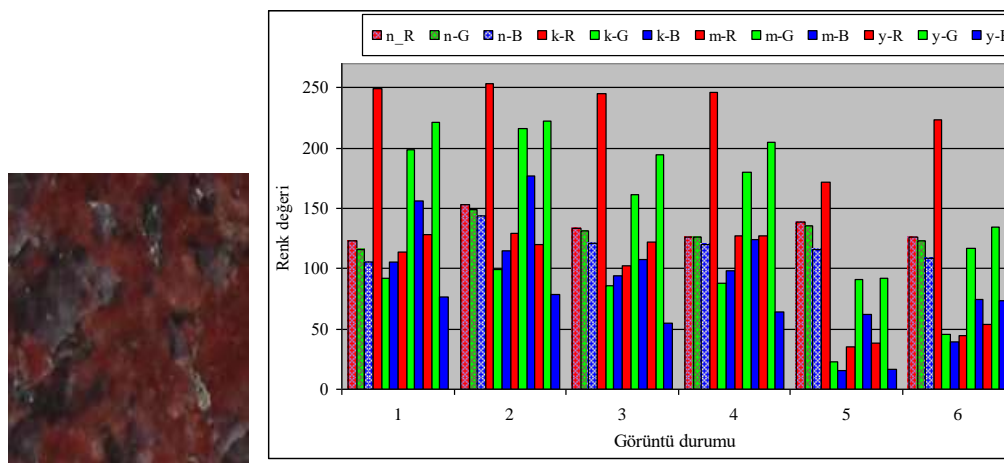
Differences in rock colours have been used to recognise the rock minerals through colour charts. Moreover, digital colour recognition apparatus have been used to identify solid materials' surface colours in more equipped way. Especial optical and electronic lens, cameras, especial lighting and computers are used in this machine image capturing technology and well documented in colour photography science and technology literature. Defects in human eyes (colour blinding, eye related problems, etc.) and repeatability of digital image analyses cause to research on rock surface colour recognition as well. Gokay and Uzdemir (1999) supplied a digital image evaluation work for marble surface colour identification and then the research has been expanded by the studies of; Gundogdu and Gokay (1999), Gokay and Gundogdu (2000; 2001; 2007). Surface colours of rocks have long been considered as one of the factors influencing the project in monumental buildings' restoration works. Pascua et.al (1999) determined the colour of construction material to use in restoration works to care for their original appearance. Concha-Lozano, et.al. (2013) for example performed visual tests to determine colour range of the replacement stones in monument repair works. By this way they selected stones which are aesthetically compatible. Fonseca (2012) on the other hand worked for properties of bricks and ceramic roof cover plates including their colours as well. Similar studies have been performed for colour changing of building stones due to micro-organisms and air pollutions in cities. Akkoyun et.al. (2013) studied on a computer program to obtain natural rocks' surface colour properties. They performed field studies on Orosei limestone (Sardegna, Italy). They produced statistical colour data for the selected limestone sample surfaces. In similar way Souse and Goncalves (2013) used colour analyses as well to distinguish the rock surface polishing states. In micro scale analyses, Baykan et al. (2010) used digitized images of thin rock sections to identify rock minerals. They concluded that results of colour analyses (Fig.5) performed by using a "Lab colour space" (L.a.b) system (Hunter, 1948) were similar to the outputs of "RGB colour model" (Poynton, 2003), but they were better than HSV results ( "Hue, Saturation, Value" representation in cylindrical coordinate system, Joblove and Greenberg, 1978).

In mining, beside the colour of minerals, aesthetic appearances of some rock surfaces are also important for their marketing. Construction of any buildings or any repairmen projects of historical monuments might require natural dimensioning stones or plated rock slaps (limestone, marble, travertine, granite, etc.) in pre-described colours and textures. In natural stone business, brand marks of stones have been selected, named, according to their colours, colour-homogeneity and textures. In some cases, due to natural stone mining conditions, natural stone products have not been supplied as previously agreed on. The results have generally been cancellation of rock slaps orders by the project owners in these cases. Gundogdu and Gokay (2003) and Gokay and Dogan, (2006) produced methodologies to define digital rock colour homogeneity and volumetric rock colour description respectively to offer digital description of rock slap colours and rock colour homogeneity. Agreement on digital stone surface colours together with pre-described digital variations in colours and homogeneity were assumed helpful for natural stone miners and end users in their business.

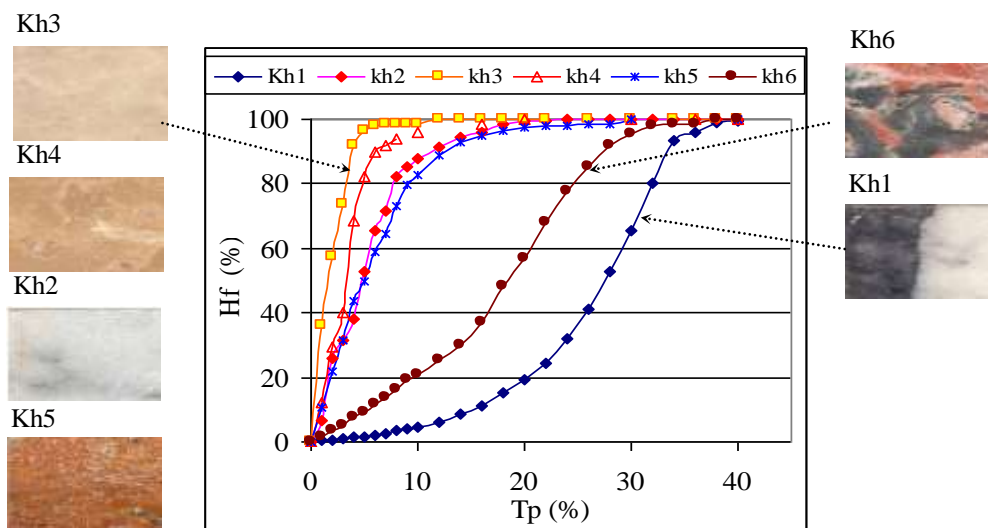


**Figure 5.** Thin section obtained from a rock sample was photographed and digitized to get following images: a) Cross-polarized images, b) Plane-polarized images, c) Images in RGB, d) Images in HSV, e) Images in (L.a.b). (Baykan et.al. 2010)

Rock surface colours, in-situ or fresh cut, demonstrate different colour features. Rock surface colours seem also different for polished or wet conditions. Rock surfaces; weathered or freshly cracked, dry or wet, polished or unpolished, are all appeared different in their photographs. These differences can also be intensified by using different lighting conditions (usage of different bulb types to get; daylight, Red, Green or Blue colour lighting). Gokay and Dogan, (2006) offered a barcode scheme to define rock surface appearances (Fig.6) includes mentioned colour features as well. Rocks, especially marble, travertine, granite, limestone slaps' surface have different colours. However, aesthetic point of view, colour distribution, homogeneity, on selected rock surface is also influencing factor on their marketing (Gokay, 2003). Therefore colour homogeneity of natural rock surface was researched to define their homogeneity. Gokay and Gundogdu, (2007) proposed colour homogeneity test (Fig.7) for rock slab surface colour distributions. Colour differences in selected surface area were analysed in this work pixel by pixel to determine unexpected change of digital colour value. Neighbouring pixels on rock surface image which had their own colour values were main starting points to analyse total colour homogeneity.



**Figure 6.** Natural rock surface identification, coloured-barcode for Rosa-Beta granite (Gokay and Dogan, 2006). (Image obtained under following situation and lighting; 1. dry-front, 2. dry-back, 3. wet-front, 4. wet-back, 5. wet-break surface, 6. dry-break surface, n: normal day lighting, k: red lighting, m: blue lighting, y: green lighting)



**Figure 7.** Colour homogeneity (Hf) description together with its tolerance percentage value (Tp) for the selected marble images, (Gokay and Gundogdu, 2007)

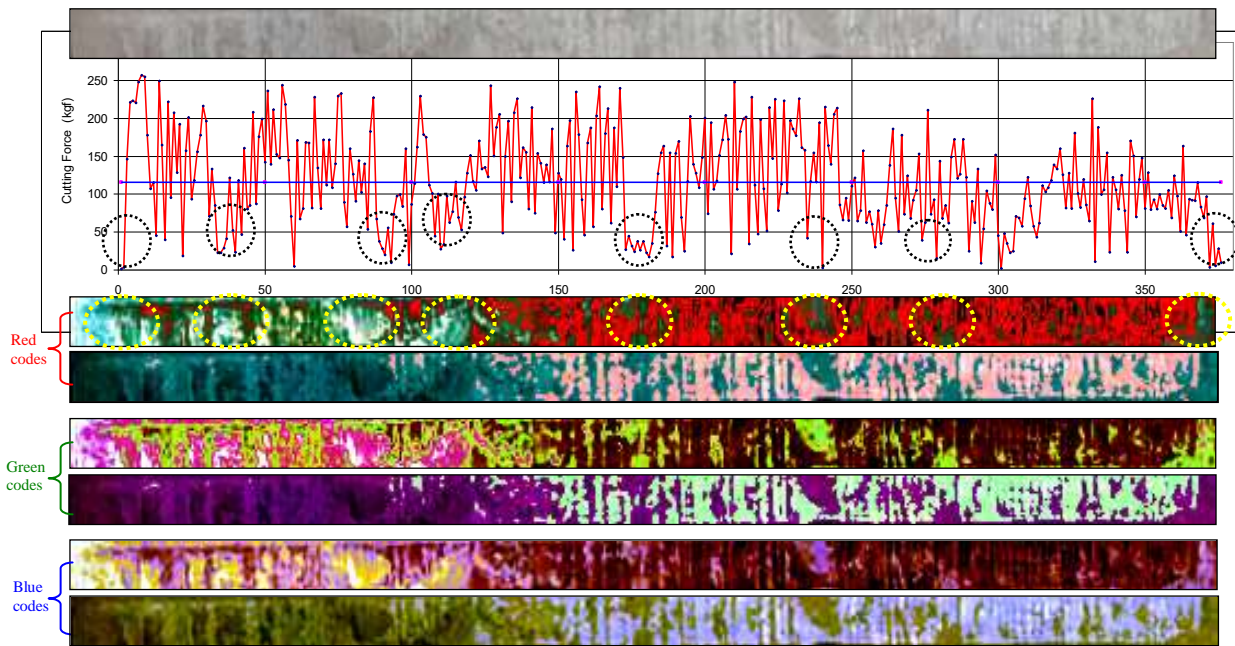
By using similar colour analyses, colour distribution along the rock cutting traces was explored in this research digitally to differentiate their colour zones. Drag bits' rock cutting tests usually produce traces similar to images shown in Fig. 8 & 11. Rock cutting test equipment shown in Fig.3 was used here to excavate these traces with its 12.7 mm wide drag bit (Fig.4). During the cutting test, different drag width and depth were also used to understand their influence in rock cutting mechanism. Each cutting test was started at left side of the blocked rock samples and the gaps between neighbouring traces were arranged to 8 mm. Each rock cutting test was performed in very short period of time (about 1-3 second) and trace obtained in each test about 250 mm long. When the digital images of each trace were analysed one by one, separate coloured zones were recognised. Results of colour analyses performed for white marble cutting traces (trace 3 and 5) were illustrated in Fig. 9 and 10. Original photograph of each trace under inspection was given at the top of these figures. After obtaining original images of traces, they were processed by Photoshop programme to enhance their RGB colour bands separately to extra-graded their appearance. Enhanced image of traces have revealed more clearly the coloured zones. Since rock cutting test equipment measured and saved the cutting force, ( $F_c$ ), fluctuation during test period, it can be graphed as seen in Fig. 9,10,12 and 13. These graphs present cutting force, ( $F_c$ ), differentiation in total testing time (1-3 second). Maximum and minimum cutting force fluctuations can also be noticed on these graphs after illustrating the average value line on each graph. Maximum force values here stand for cutting difficulties during test period. In other words, drag bit applied more cutting force, ( $F_c$ ), at these points to overcome and crack the rock barrier in front. Cutting force, ( $F_c$ ), graph shapes are look like a kind of zigzag, crisscross, that means cutting force had always been in changing state, there was no stable time period for this variable. When trace of each drag bit cuts was controlled in detail, there were some spots along the traces where they looked like more shadowy, shiny, etc. After deciding digital colour analyses for cutting test traces, their digital images were taken carefully. Digital colour analyses showed also some differentiation in colours along the traces. Examples of these colour segregations can be seen in Fig.9, 10, 12 and 13. It was also recognized that there were related spots between coloured zones along cutting traces and cutting force ( $F_c$ ) values. There were coloured zones detected for example along trace-3 for white marble (Fig.9) and they were circled for better illustration purposes. The position of circled coloured zones and low cutting force, ( $F_c$ ), levels are coinciding here. Similar analyses were performed for red-tuff rock sample (Fig.11) and the resultant colour enhancements for selected cutting traces are given in Fig.12 and 13.

Enhanced coloured images of cutting traces have narrow (wideness : 2-3 mm) vertical coloured sectors interrupted with other coloured zones in some parts of traces. The trace lengths demonstrated in figures represent also the period of testing times. Trace width on the other hand represent the width of cut that is corresponding the width of drag bit (12.7 mm). Therefore vertical 2-3 mm coloured zones which were observed at some parts of traces represent "full contact cutting" of drag bit on that position of rock surface. Interruption in these "vertical thick line" type coloured zones are matched with the zigzag shape of cutting force, ( $F_c$ ), graphics. Since drag bit's cutting action in hard rock has repetition of push, crack and relax periods, colour analyses of these traces have similar repetitive vertical colour bands which can be clearer after colour enhancement works.

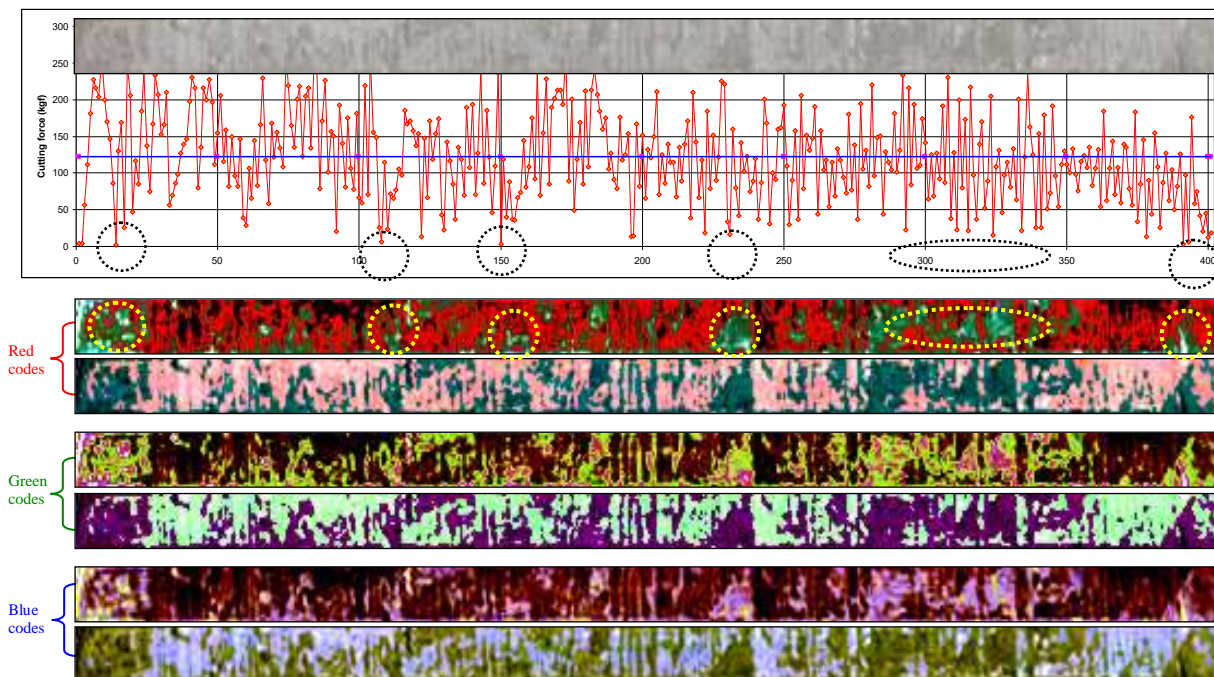


**Figure 8.** Drag bit traces on white marble surface; 12.7 mm wide drag bit started the cutting from left side of the specimen, (Cutting trace lengths were about 250 mm in average)





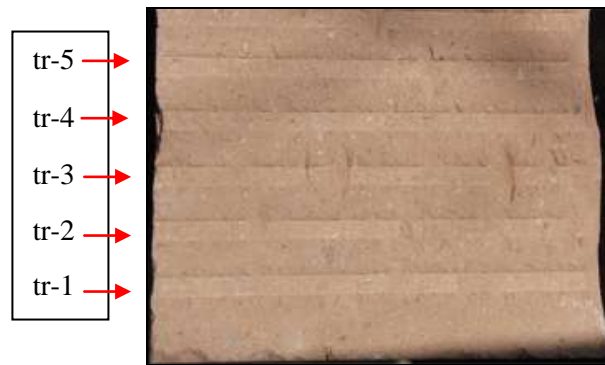
**Figure 9.** Cutting force fluctuation and colour zones, sectors which had been obtained during total time of trace-3 cutting test of white marble, (First image at the top is original photograph of the trace-3. Other images are showing coloured sectors in Red, Green, Blue colour enhancement. The blue line in the graphic is showing average cutting force value, 115.64 kgf, obtained from 376 test readings)



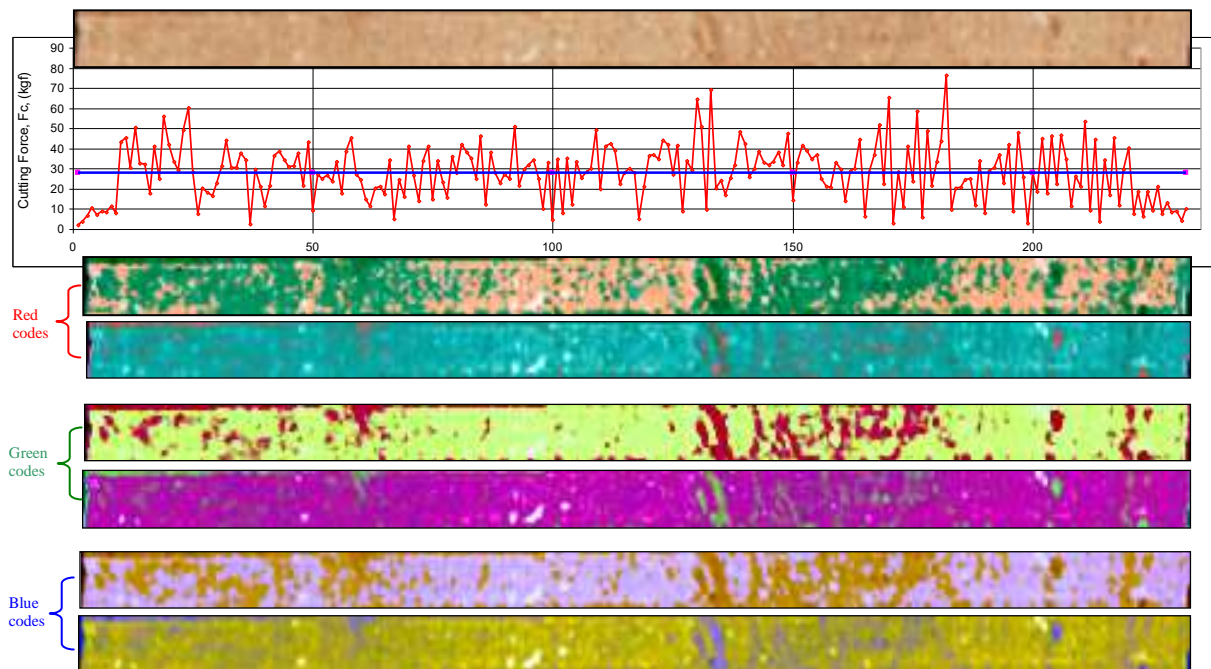
**Figure 10.** Cutting force fluctuation and colour zones, sectors which had been obtained during total time of trace-5 cutting test of white marble, (The blue line in the graphic is showing average cutting force value, 121.71 kgf, obtained from 401 test readings)

Close observation of cutting traces and rock sample textures directed the focus of this research on micro weaknesses of rock samples. Because, it was understood that rock sample's original weakness

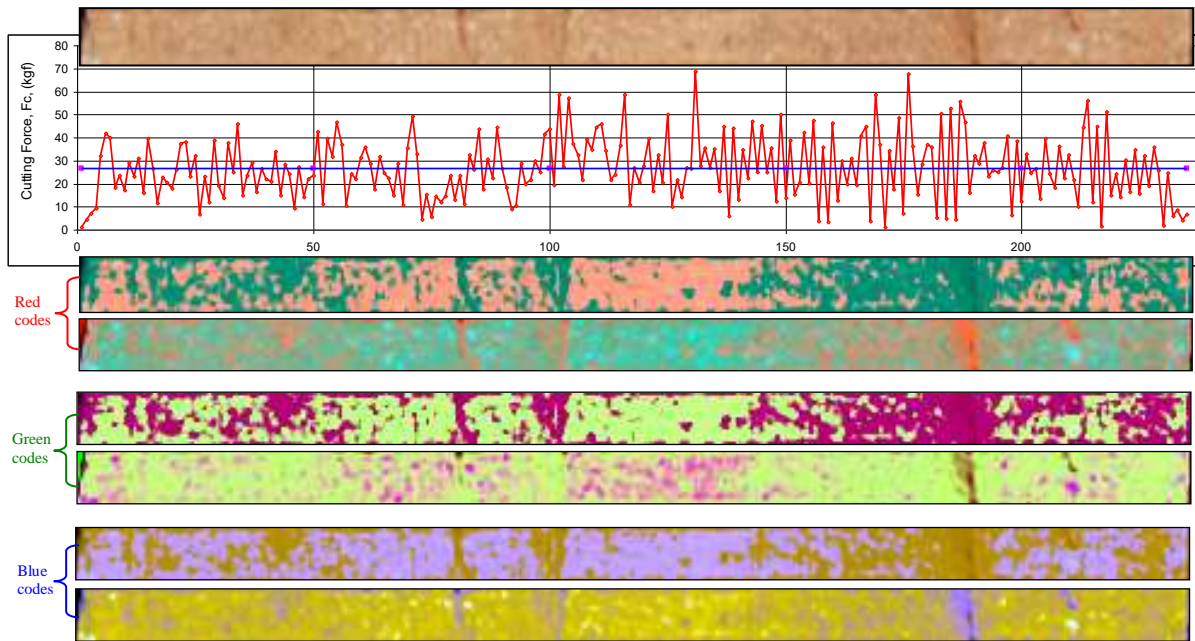
zones had required less power to chip away with respect to hard and crystalline parts of the same samples. These weakness zones may have their own colour differentiation with respect to original rock mass colours. Rock cutting action, in some cases, cleared away hard parts covering these zones. Moreover, due to cutting force applied to rock mass, micro fissures may connect to form larger chips to move away also. Cutting traces have certain clues of drag bit scraping actions and powdered surface traces. These traces may have also chipping away clues due to fissures, weakness zones or cleavages. They left different traces at the back due to cutting action. Micro scale rock weakness zones can be originated due to one of the following facts; micro fissures, cleavages, depositional micro scale layers, micro scale cracks due to primary rock stresses etc. If these micro discontinuities have groundwater in them, their appearances have been changed more quickly due to rock alterations.



**Figure 11.** Drag bit traces on red tuff surface; 12.7 mm wide drag bit started the cutting from left side of the specimen



**Figure 12.** Cutting force fluctuation and colour zones, sectors which had been obtained during total time of trace-2 cutting test of red tuff sample, (The blue line in the graphic is showing average cutting force value, 27.95 kgf, obtained from 232 test readings)



**Figure 13.** Cutting force fluctuation and colour zones, sectors which had been obtained during total time of trace-3 cutting test of red tuff sample, (The blue line in the graphic is showing average cutting force value, 26.63 kgf, obtained from 235 test readings)

Colour differentiation along digitized cutting trace images were evaluated to understand drag bit cutting mechanism by considering push-crack-relax periods together with weakness zones and micro fissures. Detected coloured sectors along the related cutting traces (Fig.9-10 and 12-13) and coinciding zones of cutting force, ( $F_c$ ), levels are presented here by circular-elliptical marks drawn over the graphs. When the given images in these Figures were checked in detail, the effects of colour enhancements in Red, Green and Blue colour bands can be seen obviously. The features related with drag bit cutting action are become noticeable in those enhanced images. Original photographs, as seen at the top of these figures, are not comprehensible to realize all the aspects of cutting action. However improved images, two boosted images were given for each RGB colour bands, present the drag bit cutting action with more featured way. It was recognized that, coloured sectors which were detected along the cutting traces of the selected tests were representing different mechanical features happened during cutting action. So these sectors and cutting force, ( $F_c$ ), fluctuations were evaluated to interpret drag bit cutting performance more logically. When the decision was given for which coloured zones were cut with low energy levels which are directly related with lower cutting forces, ( $F_c$ ), requirement, cutting force fluctuation graph for each rock cutting test was then studied for average, lower and higher cutting force, ( $F_c$ ), levels. The results obtained from this study were then used to compare the coloured sectors determined along the cutting traces. These comparisons led to understand the "easy cutting" or "difficult cutting" levels along the cutting traces. These levels are directly related with energy consumption in drag bit cutting tests performed. If the "difficult cutting" levels are high for a specific cutting tests, energy consumption and drag bit demolishing are expected high also. So if a cutting trace images has coloured zones representing "difficulties" in cutting, that may also used to indicate higher drag bit wear and higher energy consumption for the tested rock sample. Drag bits are used for different excavation machineries. When these machines (excavators, roadheaders, coal cutters etc.) are used to dig an orebody or country rocks, they leave many cutting traces on the rock face at the related workplaces. Taking full image of these traces and analyses with their colour differentiation may result in to understand "easy" or "difficult" in cutting position, levels, in that particular cutting operation.



## CONCLUSION

Colour analyses have been used in rock colour evaluation and rock identification in earth science applications. Similarly, drag bit cutting traces on rock specimens of rock cutting tests were photographed digitally here and these images were enhanced in red-green-blue colour bands. Differentiated colour sectors along the traces were compared with cutting force, ( $F_c$ ), fluctuation graphs obtained for related cutting tests. Resemblances were identified for "rock cutting force, ( $F_c$ ), values" and "colour sectors along rock cutting traces". Coloured sectors in a single cutting trace can then be used to understand if the drag bit cutting consumes more/less energy compared to other cutting traces. This method may also be applied mining or other workplaces where excavators equipped with drag bits are used to trim rock masses. Colours obtained from their bit traces on working faces may also be analysed to understand their energy consumption.

## REFERENCES

- Akkoyun, O., Careddu, N., Marras, G., 2013, "An Investigation of Colour Properties of Orosei Limestones (Italy) by Using Computer Program", *Key Engineering Materials*, Vol. 548, pp. 173-182.
- Baykan, N.A., Yilmaz, N., Kansun, G., 2010, "Case Study in Effects of Color Spaces for Mineral Identification", *Scientific Research and Essays*, Vol. 5 (11), pp. 1243-1253.
- Concha-Lozano, N., Lafon, D. Sabiri, N., Gaudon, P., 2013, "Color Thresholds for Aesthetically Compatible Replacement of Stones on Monuments", *Color Research & Application*, Vol.38 (5), pp. 356-363.
- Dursun, A.E., 2012, *Rock Cutting Properties of Limestone Rock Formations Located at NW Site of Konya city, (Konya şehir merkezinin KB'da yer alan kirecâslarının kesilebilirliği)*, PhD Thesis, (Dissertation date: Dec.18th 2012) Selçuk University, Graduate School of Natural Science, Mining Engineering Department, Campus, Konya, Turkey, (in Turkish).
- Evans, I., 1984, "Basic Mechanics of The Point Attack Pick", *Colliery Guardian*, May 1984, pp. 189-193.
- Fonseca, B.M.S., 2012, *Influencia do Nevoeiro Salino na Degradação de Materiais Ceramicos Aplicados em Construções*, MSc Thesis, Univ. Nova De Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 165, Portugal.
- Gokay, M.K., Uzdemiç, Ö., 1999, "Digital Classification of Marble Slap Surface Colours", (Mermer renklerinin sayısal olarak sınıflandırılması), *Journal of Konya Chambers of Industry*, Vol. 30, pp.25-27, Konya, Turkey, (in Turkish).
- Gokay, M.K., Gundogdu, I.B., 2000, "Colour Analyses and Application of Colour Analyses for Marble Slap Surfaces", (Renk analizi ve mermerlerde renk analizi uygulamaları), *Journal of Stone World & Stone and Stone Technologies in Turkey*, Vol. 17, pp. 90-96, Izmir, Turkey, (in Turkish).
- Gokay, M.K., Gundogdu, I.B., 2001, "Classification of Marble Colour by Using Digital Analyses and Usage of This Method in Marble Cutting and Dimensioning Factories", (Mermer renklerinin sayısal analiz yoluyla sınıflandırılması ve mermer işleme tesislerindeki kullanılabilirliği), *Mining Journal, (Madencilik Dergisi)*, *Mining Engineering Chambers of Turkey*, Vol. 40, (2-3-4), pp.3-10, Ankara, Turkey, (in Turkish).
- Gokay, M.K., 2003, "Evaluation of Marble Colour Homogeneity", (Mermer renk homojenliğinin sayısal değerlendirilmesi), *Journal of Stone World & Stone and Stone Technologies in Turkey*, Vol. 34, pp.160-173, Izmir, Turkey, (in Turkish).
- Gokay, M.K., Dogan, K., 2006, "Identification of Colours for Marble Mass", (Mermerlerde hacimsel renk dağılımının araştırılması). 5th Marble Symposium of Turkey, (Türkiye V. Mermer Sempozyumu, ed. Ersoy, M.). *Mining Engineering Chambers of Turkey, MERSEM-2006*, 2-3 February 2006, pp. 131-140, Afyon, Turkey, (in Turkish).



- Gokay, M.K., Gundogdu, I.B., 2007, "Colour Identification of Some Turkish Marbles", *Construction and Building Material*, Vol. 22, 7, July 2008, pp. 1342-1349.
- Gokay, M.K., Dursun A.E., 2013, "Usage of Boom Type Roadheader for Tuffitic Rock Masses in Nevsehir Region in Turkey", (Nevsehir bölgesi tüflerinin kazısında kollu galeri acma makinelerinin kullanılabilirliğinin araştırılması), Selcuk University, *Journal of Engineering, Science & Technology*, SUJEST, Vol. 1 (1), ISSN: 2147-9364 (Electronic), pp. 13-18, (in Turkish).
- Gundogdu, I.B., Gokay, M.K., 1999, "Digital Image Analysis of Marble Slap Surface", (Mermerlerin sayisal goruntu analizleri), 10th Engineering Week of Turkey, S.Demirel University, Isparta, Turkey, 20-23 October 1999, (in Turkish).
- Gundogdu, I.B., Gokay, M.K., 2003, "Colour Homogeneity of Marble Slap Surface- Digital Analyses of Natural Marble Slap Surface Motifs", (Mermer yüzey rengindeki homojenlik, mermer desenlerinin sayisal incelenmesi), 4th Marble Symposium of Turkey, (Türkiye IV. Mermer Sempozyumu). Mining Engineering Chambers of Turkey, MERSEM-2003, Afyon, Turkey, pp.231-242, 18-19 December 2003, (in Turkish).
- Hunter, R.S., 1948, "Photoelectric Color-difference Meter", *JOSA*, V38, N7, 661. (Proceedings of the Winter Meeting of the Optical Society of America).
- Joblove, G. H., Greenberg, D., 1978, "Color Spaces for Computer Graphics", *Computer Graphics*, Vol.12 (3), pp. 20-25, Doi:10.1145/965139.807362.
- Merchant, M. E., 1945, "Basic Mechanics of Metal Cutting Process", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 11, A-168.
- McFeat-Smith, I., Fowell R.J., 1977, "Correlation of Rock Properties and the Cutting Performance of Tunnelling Machines", *Proceedings of a Conference on Rock Engineering*, CORE-UK, Conference organized jointly by the British Geotechnical Society and Department of Mining Engineering, The University of Newcastle upon Tyne, UK, pp. 581-602.
- Pascua, N.G., Sanchez de Rojas, M.I., Frias, M., 1999, "Measurement of Colour in Different Construction Materials. The restoration in sandstone buildings", *Materiales de Construcción*, Vol. 49, 253, Doi:10.3989/mc.1999.v49.i253.455
- Poynton, C.A., 2003, *Digital Video and HDTV: Algorithms and Interfaces*, Morgan Kaufmann, USA, ISBN 1-55860-792-7
- Roxborough, F.F., 1973, "Cutting Rock with Picks", *The Mining Engineer*, Jun1973, pp. 445-452.
- Sousa, L., Goncalves, B., 2013, "Differences in the Quality of Polishing Between Sound and Weathered Granites", *Environmental Earth Sciences*, Vol. 69 (4), pp. 1347-1359.

## ANALYSIS OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS IN ANTALYA PROVINCE (TURKEY) USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS

<sup>1</sup>Ela Ertunç, <sup>1</sup>Tayfun Çay, <sup>2</sup>Ömer Mutluoğlu

<sup>1</sup>Selçuk University, Engineering Faculty, Department of Geomatics Engineering, Konya, Turkey,

<sup>2</sup>Selçuk University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Architecture and Urban Planning, Konya, Turkey

<sup>1</sup>elaertunc@selcuk.edu.tr , <sup>1</sup>tcay@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>omutluoglu@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 01.08.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.11.2016)

**ABSTRACT:** In Turkey, about 4000 people each year die in traffic accidents and about 200,000 people each year are injured. For this reason, this problem of road traffic in Turkey is found a solution to an urgent. In this study, in ensuring of security of road traffic has been intended to introduce of the importance of Geographic Information Systems (GIS).

Antalya Province where is one of Turkey's major metropolises have the problem of heavy traffic. In this study has been made general statistical analysis in a GIS environment of road traffic accidents occurred in 2009 and 2010 years in Antalya Province Center. Also, traffic accidents has been analyzed by correlating environmental factors with parameters situated in a traffic accident data set.

In the beginning of this study, by using ArcMap-10 software, the satellite map of Antalya Province has been digitized. A database has been created with Arcmap-10 software using fatal-injury traffic accident data occurred in Antalya City Center between 2009 and 2010 years. Fatal-injury traffic accidents on "Intersection" and "boulevard-highroad-street" have separated of each other and by using accident data (*accident day, time interval of accident, occurrence type of accident, accident character, the number of dead, the number of injured*) belonging to accidents occurring in each one, on a satellite map in the ArcMap-10 software of accidents were conducted the statistical evaluations in both visual and graphics. In GIS, the regions where have intensive of intersection accidents have been determined. As a result, at the intersections in Antalya Province Center, it was identified 41 accident hot spots for the year 2009, and was identified 57 accident hot spots for the year 2010. A total of 23 intersections were defined as accident hot spot in both years. Also, on boulevards-highroads-streets on the satellite map in Arc-Map-10 software has been determined 29 accident-prone regions as the years.

**Key Words:** *Traffic accident analyzing, Geographic information system, Accident hot spots, Antalya, Accident-prone regions*

### Antalya (Türkiye) İl'in deki Karayolu Trafik Kazalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Yardımıyla İncelenmesi

**ÖZ:** Türkiye'de her yıl yaklaşık 4000 kişi trafik kazalarında ölmekte, yaklaşık 200000 kişi de yaralanmaktadır. Bu nedenle Türkiye'de trafik sorununa acil olarak bir çözüm bulunması gerekir. Bu çalışmada, karayolu trafik güvenliğinin sağlanmasında Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin (CBS) öneminin ortaya konması amaçlanmıştır.

Türkiye'nin önemli metropollerinden biri olan Antalya kenti yoğun trafik sorununa sahiptir. Bu çalışmada, Antalya İl Merkezi'nde 2009 ve 2010 yıllarında meydana gelen karayolu trafik kazalarının CBS ortamında genel istatistiksel değerlendirmeleri yapılmış ve trafik kaza veri setinde yer alan parametreler çevresel faktörler ile de ilişkilendirilerek trafik kazaları analiz edilmiştir.

DOI: 10.15317/Scitech.2016.60

Bu çalışmada başlangıçta Antalya İl'ine ait uydu haritası ArcMap-10 programı kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Antalya İl Merkezi'nde 2009 ve 2010 yıllarında meydana gelen ölümlü-yaralanmalı trafik kaza verileri kullanılarak ArcMap-10 programında bir veri tabanı oluşturulmuştur. "Kavşak" ve "bulvar-cadde-sokaklardaki ölümlü-yaralanmalı trafik kazaları birbirinden ayrılmış ve her birinde meydana gelen kazalara ait kaza verileri (*kaza günü, kaza saat aralığı, kaza oluş türü, kaza karakteri, ölü sayısı, yaralı sayısı gibi*) kullanılarak, kazaların ArcMap-10 programındaki uydu haritası üzerinde hem görsel hem de grafikler halinde istatistiksel değerlendirmeleri yapılmıştır. CBS ortamında kavşaklarda meydana gelen kazaların yoğun olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Antalya İl Merkezi'ndeki kavşaklarda 2009 yılında 41, 2010 yılında 57 kavşak kaza kara noktası belirlenmiştir. Toplam 23 kavşak ise her iki yılda da kara nokta olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, Arc-Map-10 programındaki uydu haritası üzerinde bulvar-cadde-sokaklarda yıllar itibariyle 29 kazaya meyilli bölge tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karayolu trafik kaza analizi, Coğrafi bilgi sistemi, Antalya, Kaza kara noktaları, Kazaya meyilli bölgeler.

## INTRODUCTION

According to Road Traffic Law in Turkey (date: 13 October 1983, number: 2918); "*traffic is status and movements of pedestrians, animals, and vehicles on the highway*". International Labour Organization (ILO) has defined traffic accident as "*previously unplanned unexpected events causing a specific damage or injury*". Road traffic accidents rank first among accidents which cause injury all over the world.

In Turkey, nearly 4000 people die and nearly 200000 people are injured every year in road traffic accidents. For this reason, traffic problem should be examined scientifically. Aim of this study is to reveal the importance of the use of Geographic Information Systems (GIS) in assuring the safety of road traffic, and to determine the properties of traffic accidents, in terms of measures to be taken investigates the benefits.

Erdoğan et al (2008) studied the analysis of accidents in the province of Afyonkarahisar using GIS, between 1996-2006. Gündoğdu (2010) determined traffic accident hot spot and the highest potential accident hot spots using GIS-based linear analysis methods. Nizam et al. (2011) made the analysis of the traffic accidents occurring at the state roads remaining within Erzurum province by using Arc-GIS. Kabakuş et al. (2012) have made the analysis of traffic accidents occurring in the districts of Erzurum province by taking advantage of GIS technology. Reshma and Shrarif (2012) have identified important accident hot spots in Karnataka (South Bangalore-India) by using Arcmap-10 software. Geymen and Dedeoğlu (2016) investigated the traffic accidents in Kahramanmaraş city center according to the topography of the land and occurrence time of the accident occurrence time, and demonstrated the reasons which cause the formation of these factors by the spatial analysis in the GIS.

Antalya Province which is one of the important cities of Turkey has heavy traffic problem, as in other major metropolitan cities. In this study, fatal-injury highway traffic accidents occurring in 2009 and 2010 in Antalya Province Center were performed statistical evaluations with the help of GIS, and determined factors affecting the traffic accidents. Also, identified accident hot spots at intersections and identified accident-prone regions at boulevard-street-street were demonstrated.

## THE USE OF GIS FOR ANALYSIS OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS

GIS have been defined as transactions provided input, storage, questioning, mapping and analysis of spatial and nonspatial data in order to support the activities of enterprises by Grimshaw (1994). Many countries in the world analyze traffic accidents occurring on highways using GIS. They determine the causes of road traffic accidents by depending on road, vehicle, road conditions or weather conditions

and take safety measures where there is a traffic accident by examining the results of these analyzes (Ertunç, 2013).

In order to identify the causes of traffic accidents, accident data need to be examined in detail. For this reason, all the data for accidents are indicated in traffic accident reports. For example, date of accident and time of accident, type of accident occurrence, the status of the road where the accident occurred, etc. GIS provides a detailed examination of this information and as soon as possible. GIS can be used effectively in order to identify road accident hot spots. Also, GIS can provide a link between two or more data previously unrelated. The most beneficial aspect of GIS is the ability to establish a relationship between the attribute information (day of accident, month of accident, hour and accident, etc.) and spatial objects (street names, route numbers, etc.) (Reshma and Sharif, 2012). GIS can collect non-graphical features as geo-reference data and connect them with the geographical map features. For this reason, GIS gives useful results in studies of accident analysis.

## MATERIAL AND METHOD

Antalya is geographically situated between  $36^{\circ} 07'$  -  $37^{\circ} 29'$  north latitudes and  $29^{\circ} 20'$  -  $32^{\circ} 35'$  east longitudes. Surface area of the city is 20815 km<sup>2</sup> and the population of the city is approximately 2 million. Study area includes the Antalya Province Center (Figure 1). Antalya Province Center consists of Aksu, Döşemealtı, Kepez, Konyaaltı and Muratpaşa counties.



Figure 1. Showing on the map of the study area

The data of fatal and injury traffic accidents were collected from Traffic Accident Detection Proceedings via Antalya Police Department and Ankara Police Headquarters Traffic Education and Research Department. These information are recorded by using the WGS-1984 UTM coordinate system.

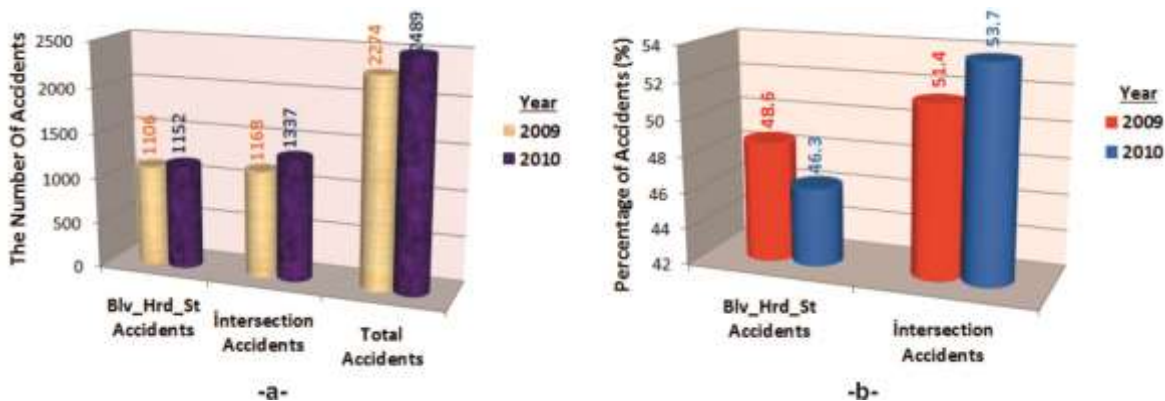
These data were tabulated into Microsoft Excel software. As a result, the data base belonging to total 4763 fatal-injury traffic accident occurred in 2009 - 2010 years was prepared. The Excel table contains traffic accident data (*year-month-day of the accident, the accident time, accident location, type of occurrence, the number of dead, the number of injured, weather, road surface condition, the geometric characteristics of the road, status of the intersection, the traffic light status, x-y coordinates of accident, vehicle type, driver age-sex-education, the character of the accident (fatal / injury) and the number of vehicles involved in the accident, etc.*). Later, the information referred to as the text in data set optimized numerically significant and numerical values of all data entered into Excel.

Initially, the satellite image belong to Antalya Province were transferred to ArcMap-10 software. Coordinates at the uniformly dispersed 20 point in Antalya City Center were measured with GPS and by considering these coordinates, the satellite map into the ArcMap-10 software was made with coordinate according to "WGS 1984 (Word Geodetic System-84)" system. Later, road axis lines was quantified on the satellite map with digitizer. The data of accidents in the data set of road traffic accidents in Excel software were transferred to the ArcMap-10 software in case of different layers "*according to intersection, boulevard-highroad-street and years*".

So, within a short time as a few minutes, it was reached to accident hot spots and accident-prone regions by being analyzed associated with fatal and injury accidents occurring at intersections and boulevards-highroads-streets in both 2009 year and 2010 year in Antalya Province Center. By taking advantage of the graphical and non-graphical query functions of GIS, analyses have been done, and they have been displayed on the screen.

## APPLICATION

On "Intersections" and "Boulevards (Blv) – Highroads (Hrd) – Streets (St)" into 2009 and 2010 years in Antalya Province Center occurred 4763 road traffic accidents in total. The number of accidents occurred at intersections are 2505. The number of boulevards-highroads-streets occurred at intersections are 2258 (Figure 2a). The ratio the total accident of intersections accident is 51.4% in 2009 year. In 2010 the ratio was increased to 53.7% (Figure 2b). Therefore, "intersection accidents" and "boulevard-highroad-street accidents" have been discussed in different chapters below.



**Figure 2.** The number of accidents (a) and percentages of accidents (b) belonging to fatal and injury accidents occurring in Antalya Province Center

### Investigation of Intersection Accidents

Accident locations occurring at intersections in both 2009 year and 2010 year in Antalya Province Center and attribute information of these accidents have been shown in Figure 3. The number of fatal and injury accidents were given in Figure 4.



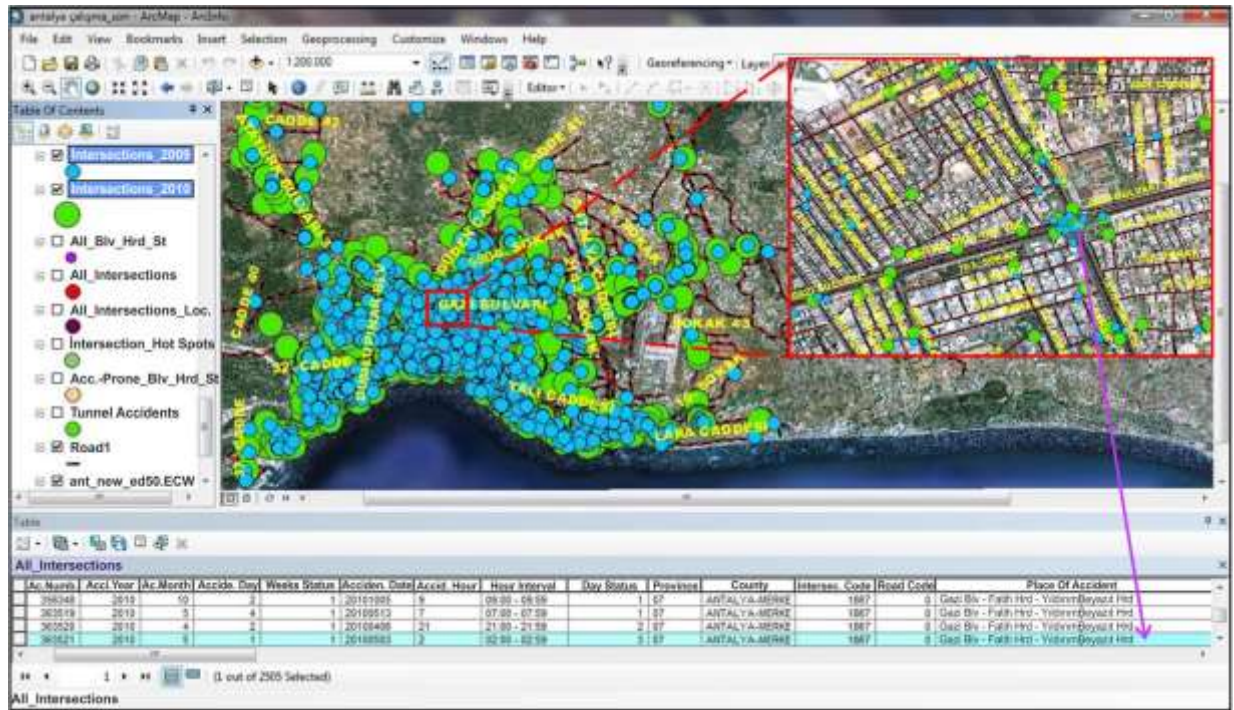


Figure 3. Displaying into ArcMap-10 software of accident locations and accident data occurring at intersections in both 2009 year and 2010 year in Antalya Province Center

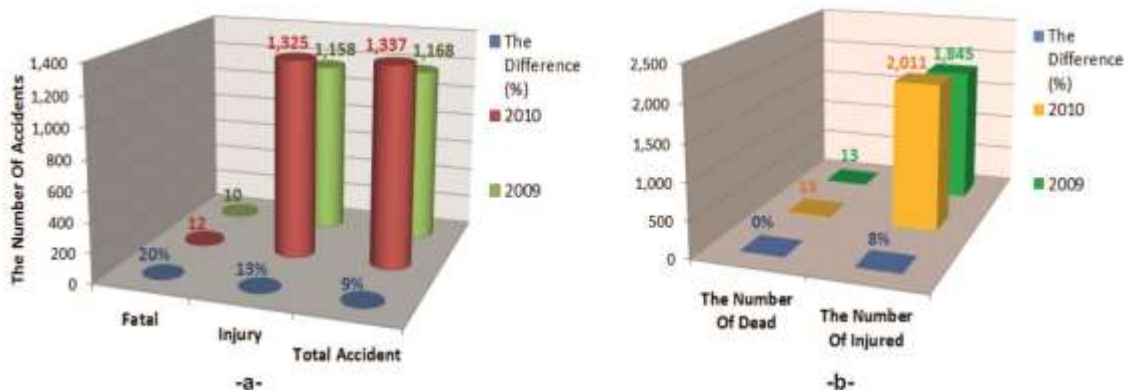
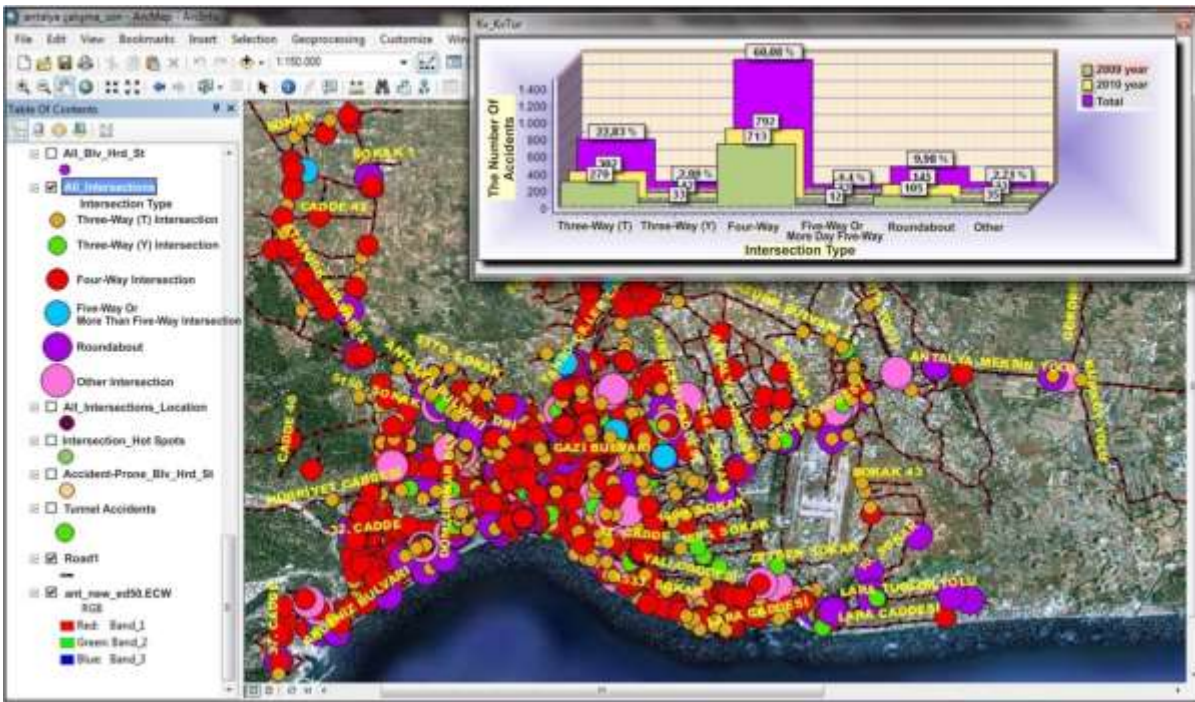


Figure 4. a) The number of fatal, injury and total accidents, and b) the number of dead and injured in fatal - injury accidents occurring at intersections in both 2009 and 2010 in Antalya Province Center

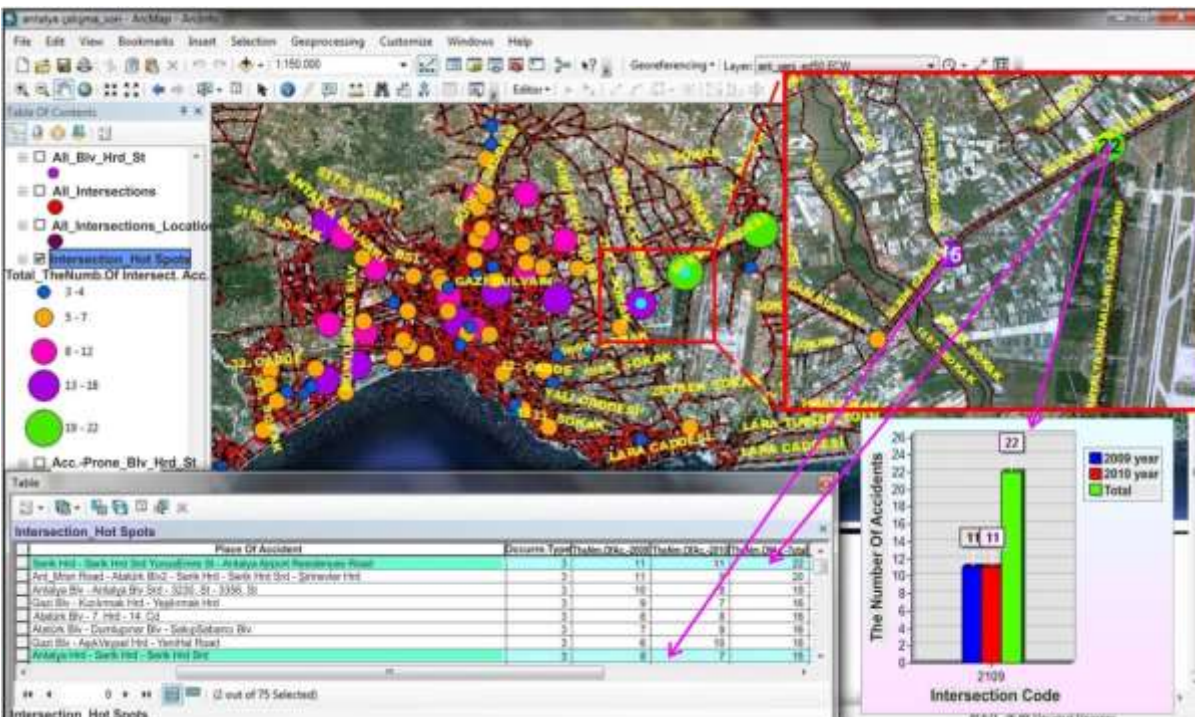
In intersection accidents, intersections with the most accidents are “four-way” intersections (Figure 5). 60.08 % of total intersection accidents have occurred at these intersections.

When we look at the general information in intersection accidents, it is seen that the more accidents occur in respectively May, October, August, June, July in both 2009 year and 2010 year. At the same time, they are the months in which tourist season is the most intense and thus the population of the province increases. In intersection accidents, most accidents have occurred between 17:00 pm and 17:59 pm. Between these hours occurred 89 accidents in 2009 year, 101 accidents in 2010 year. These hours are the times in which traffic is the most intensive. As of all years, 67.58 % of intersection accidents have occurred a result of "side impact". 795 accidents in 2009 year and 898 accident in 2010 year, have occurred a result of sideswipe. It is shown that there isn't traffic light in 72.65 % of accidents occurring at intersections. There is traffic light solely in 27.11 % of intersections.



**Figure 5.** Distribution map based on the type of intersection of accidents occurring at intersections as of all years in Antalya Province Center and histogram showing the relationship of intersection type - the number of accidents as of the years

*Accident hot spots* were determined at the intersections in Antalya Province Center and were carried out analysis in these hot spots (Figure 6). In the study area, the intersections at which occurs at



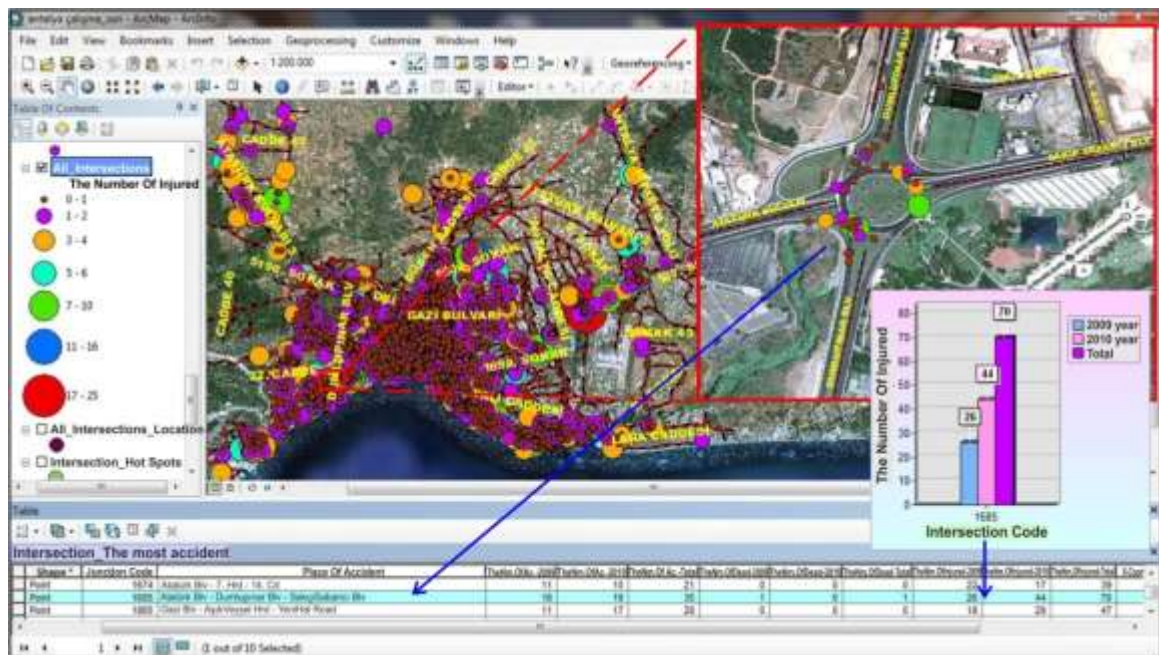
**Figure 6.** The distribution map of all accident hot spots determined at intersections in both 2009 and 2010 in Antalya City Center, and the distribution map according to the number of accidents occurring as of all years at these accident hot spots. Srd: Side Road, Occurrence Type 3: Sideswipe



least three intersection accident of the same type for each year were determined and they were identified as accident hot spots. At the intersections in Antalya Province Center, it was identified 41 accident hot spots for the year 2009, and was identified 57 accident hot spots for the year 2010. A total of 23 intersections were defined as accident hot spot in both years. Determined accident hot spots were shown in Figure 6.

Also, distribution map according to the number of accidents as of all years of accident hot spots determined at intersections in both 2009 and 2010 in Antalya City Center is shown in Figure 6. In Figure 6 is seen the histogram showing the number of accidents according to years at “Serik Highroad - Serik Highroad Side Road – Yunus Emre Street – Antalya Airport Residences Road intersection” being accident hot spot.

Distribution map according to the number of injured at accidents occurring at intersections as of all years in Antalya Province Center is shown in Figure 7. Also, in Figure 7 is seen distribution map according to the number of injured at accidents occurring in all years at “Atatürk Boulevard – Dumlupınar Boulevard – Sakıp Sabancı Boulevard intersection” determined as the accident hot point and is seen histogram showing the number of injured according to years.



**Figure 7.** Distribution map according to the number of injured at accidents occurring at intersections as of all years in Antalya Province Center, and histogram showing the number of injured according to years at “Atatürk Boulevard – Dumlupınar Boulevard – Sakıp Sabancı Boulevard intersection”

### Investigation of Boulevard–Highroad–Street Accidents

Accident locations occurring at Boulevards (Blv) – Highroads (Hrd) – Streets (St) in both 2009 year and 2010 year in Antalya Province Center and attribute information of some accidents have been shown in Figure 8.

The distribution map of fatal-injury accidents occurring in both 2009 year and 2010 year and the histogram of the number of fatal-injury accidents according to years at Boulevards (Blv) – Highroads (Hrd) – Streets (St) have been shown in Figure 9. Also, the distribution map of fatal-injury accidents occurring as all years and the histogram of the number of fatal-injury accidents according to years in





In these accidents occurring on boulevards–highroads–streets in 2009 year and 2010 year in Antalya Province Center died 69 people and were injured 3227 people (Figure 10).

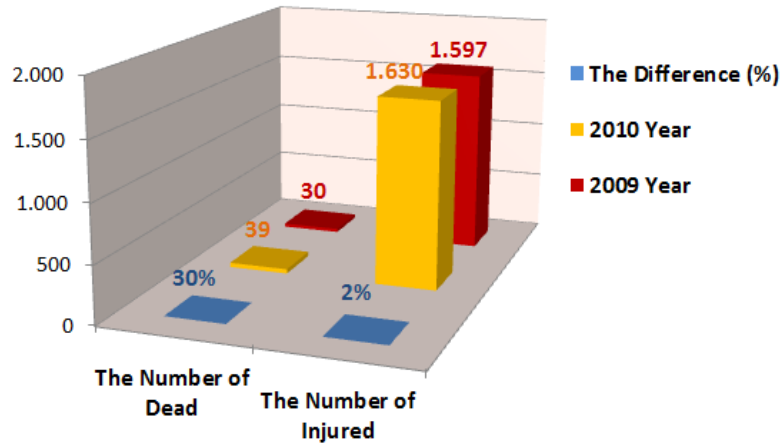


Figure 10. The number of dead and injured in fatal - injury accidents occurring on boulevards–highroads–streets in 2009 year and 2010 year in Antalya Province Center

When we analyze in terms of “type of occurrence” accidents on boulevards–highroads–streets, as of all years, 22.14 % of boulevard–highroad–street accidents have occurred a result of “side impact” (Figure 11). As of all years, 22.10 % of boulevard–highroad–street accidents have occurred a result of “pedestrian impact”.



Figure 11. The distribution map and the histogram as of the years according to “type of occurrence” of fatal-injury accidents occurring at boulevards (Blv) – highroads (Hrd) – streets (St) as of all years in Antalya Province Center. Also, the histogram of the number of fatal-injury accidents occurring as of all years in Hürriyet Highroad



When we look at the general information on boulevard–highroad–street accidents, as of all years, most accidents on boulevards–highroads–streets have occurred in may (10.36 %). The least accidents seen in February (5.67 %). The accidents appear extensively between may and October. In both 2009 year and 2010 year, November, December, January and February are the months when accidents are minimum. As of all years, most accidents have occurred on Friday with a rate of 15.15 %, whereas, minimum accidents have occurred on Tuesday with a rate of 12.62 %. In boulevard–highroad–street accidents, most accidents have occurred between 18:00 pm and 18:59 pm. Between these hours occurred 80 accidents in 2009 year, 79 accidents in 2010 year.

In Antalya Province Center, 52 accidents in 2010 year, 24 accidents in 2009 year have occurred in the tunnel. Hence, tunnel accidents holds an important place in all accidents. Rate of traffic accidents caused by male drivers is 87 %, whereas, rate of traffic accidents caused by women drivers is 7 %. In both 2009 year and 2010 year, accident rate of drivers between 26 age and 30 age are highest. As intersection accidents, it is seen that accident rate of secondary school graduates drivers in boulevard–highroad–street accidents are maximum (72.64 %). This rate is only 1.19 % for higher education graduates.

In Antalya Province Center as of 2009 and 2010 years, the regions where boulevard–highroad–street accidents are the most intense were determined. As of all years, there are 78 boulevards–highroads–streets, so that the number of accidents in these are more than 4. Taking into consideration total number of vehicles and traffic density in Antalya Province Center, as of all years on boulevards-highroads-streets has been determined 29 accident-prone regions, so that the number of accidents in these are more than 20 (Figure 12).

It is seen in Figure 12 that in Antalya Province Center, the most accident as of all years have occurred in Gazi Boulevard. In Gazi Boulevard occurred 40 fatal-injury accidents in 2009 year and occurred 54 fatal-injury accidents in 2010 year. Also, respectively Hürriyet Highroad, Antalya Mersin Way, Antalya Boulevard, Serik Highroad are regions where the most accident occurs.

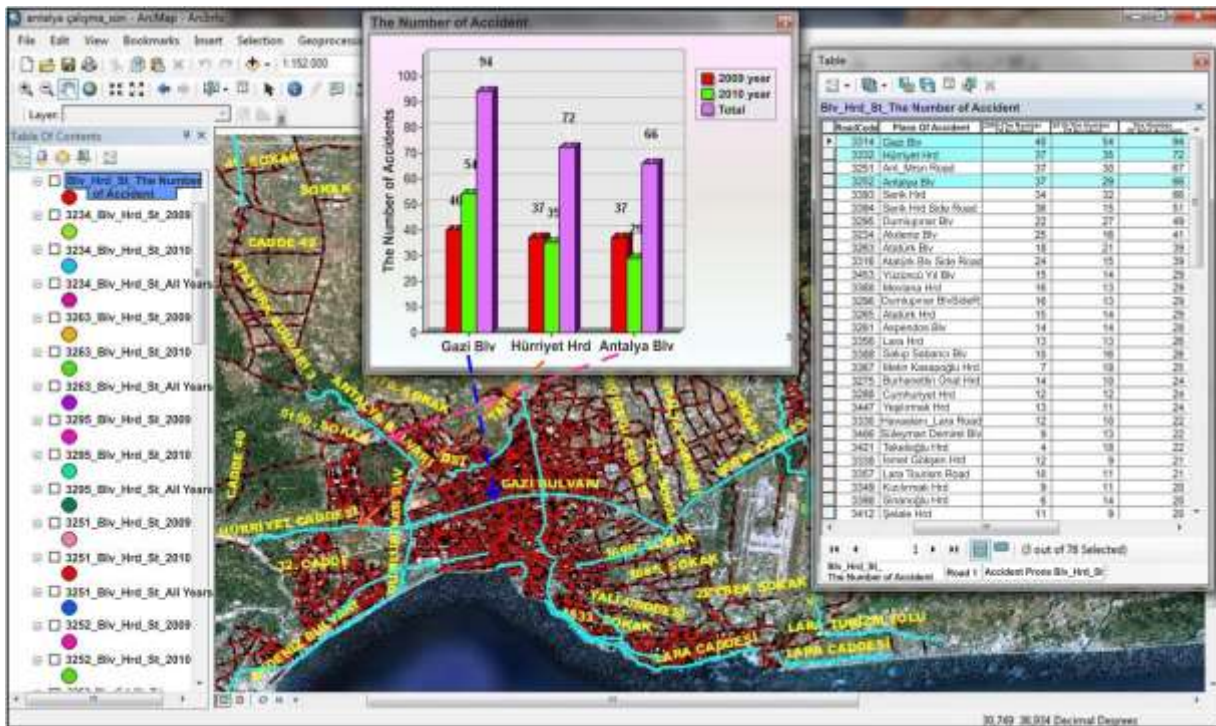
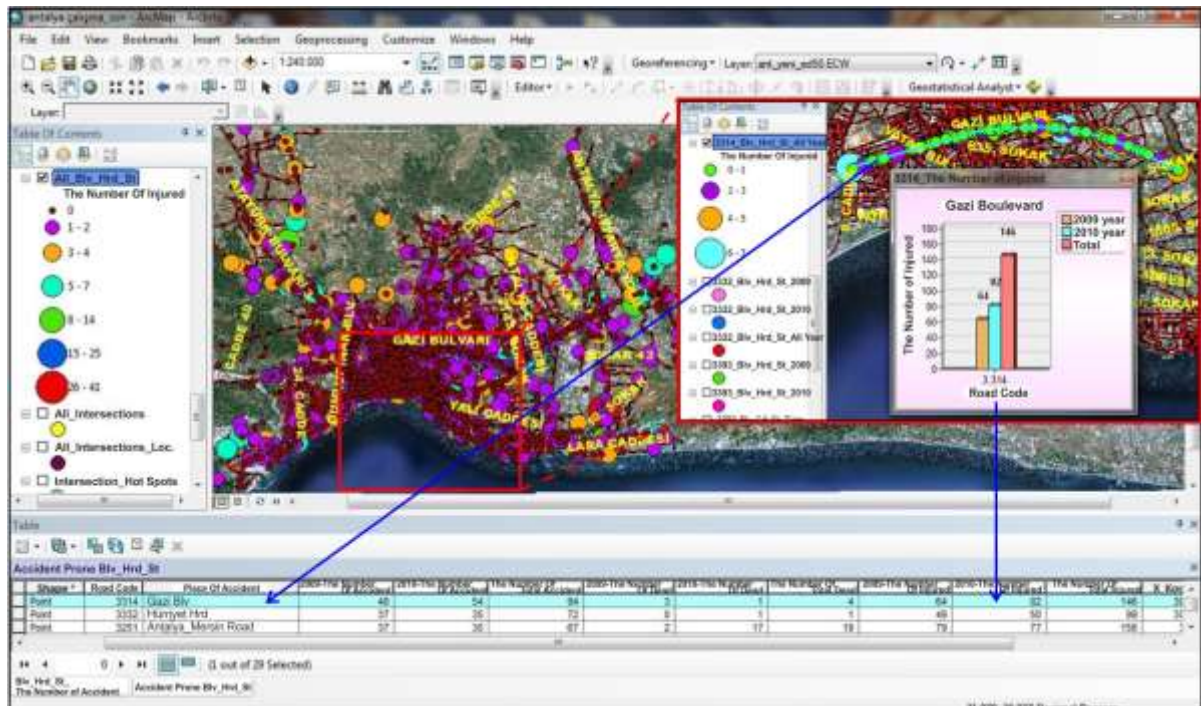


Figure 12. In Antalya Province Center, accident-prone boulevards (Blv) – highroads (Hrd) – streets (Hrd) as of all years, and the number of accidents as of years

Distribution map according to the number of injured at accidents occurring at boulevards-highroads-streets as of all years in Antalya Province Center is shown in Figure 13. Also, in Figure 13 is

seen distribution map according to the number of injured at accidents occurring in all years in “Gazi Boulevard” and is seen histogram showing the number of injured according to years. It is seen in Figure 13 that the number of injured at accidents occurring in Gazi Boulevard are 64 injured in 2009 year and are 82 injured in 2010 year.



**Figure 13.** Distribution map according to the number of injured at accidents occurring at boulevards (Blv) - highroads (Hrd) - streets (St) as of all years in Antalya Province Center. Also, distribution map according to the number of injured at accidents occurring as of all years at “Gazi Boulevard” and histogram showing the number of injured according to years

## RESULTS

GIS is a computer based tool for mapping and analyzing and integrates database operations such as query and statistical analysis. That this data are displayed enables querying for different purposes to users and facilitates to perception as visual of results. GIS collect non-graphical properties as geo-referenced data and associate with features of the geographical map them. GIS use at studies of accident analysis is a quick and very effective method for the investigation of the causes of accidents and for the development of measures.

In Antalya Province Center, total 4763 traffic accidents in both 2009 year and 2010 year were occurred. In 2009 year, 36 fatal accidents and 2238 injury accidents were occurred, on the other hand, in 2010 year, 35 fatal accidents - 2454 injury accidents occurred. 51.4 % of fatal - injury accidents in 2009 year and 53.7 % of fatal - injury accidents in 2010 year were occurred at the intersections. 48.6 % of fatal - injury accidents in 2009 year and 46.3 % of fatal - injury accidents in 2010 year were occurred at the boulevards-highroads-streets. Since intersection accidents are high rates in Antalya Province Center, to make traffic arrangements at intersections will be very useful in terms of traffic safety of Antalya Province Center.

As of all the years, 0.88 % of intersection accidents is fatal, and, 99.12 % of intersection accidents is injury. While 10 fatal accidents occurred at intersections in 2009 year, the ratio increased to 12 in 2010

year. Compared to injury accidents, the number of injury accidents was 1158 in 2009 year, the number of injury accidents were 1325 in 2010 year. On account of, both fatal accidents and injury accidents have increased in 2010 year at intersections. Total 26 people died at fatal - injury accidents occurring at intersections in both 2009 year and 2010 year, on the other hand, total 3856 people were injured at fatal - injury accidents occurring at intersections in both 2009 year and 2010 year. Most accidents have occurred in four-way intersections. It is seen that the traffic light is not at 72.65 % of intersection accidents. For this reason, traffic lights and traffic signs increased at intersections should be increased. traffic controls should be increased from May months to October months and from 17:00 hours to 17:59 hours when most traffic accidents is seen in both intersection accidents and boulevard-highroad-street accidents. At the intersections in Antalya Province Center, It has been identified 41 accident hot spots for the year 2009 and has been identified 57 accident hot spots for the year 2010. A total of 23 intersections have been defined as accident hot spot in both years.

As of all the years, 2.17 % of boulevard-highroad-street accidents is fatal, and, 97.83 % of boulevard-highroad-street accidents is injury. While 26 fatal accidents occurred at boulevards-highroads-streets in 2009 year, the ratio decreased to 23 in 2010 year. Compared to injury accidents, the number of injury accidents was 1080 in 2009 year, the number of injury accidents were 1129 in 2010 year. On account of, both fatal accidents and injury accidents have increased about 5% in 2010 year at boulevards-highroads-streets. Total 69 people died at these accidents occurring in both 2009 year and 2010 year, on the other hand, total 3227 people were injured at these accidents occurring in both 2009 year and 2010 year. 57.70 % of boulevard-highroad-street accidents have occurred as a result of "side impact", "pedestrian impact" and "behind impact". According to all years, while the most accident occurred Friday, the least accident occurred Tuesday. In both intersection accidents and boulevard-highroad-street accidents, it have been seen that accident rates increased when the education level of the drivers decreased. In Antalya Province Center as of all years, 29 boulevards-highroads-streets has been determined as *accident-prone regions*. In both 2009 year and 2010 year, Gazi Boulevard are regions where the most accident occurred.

## REFERENCES

- Erdoğan, S., Yılmaz, İ., Baybura T., Güllü M., 2008, "Geographical Information System aided traffic accident analysis system case study: City of Afyonkarahisar", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, Issue 1, January, pp. 174-181.
- Ertunç, E., 2013, *Coğrafi Bilgi Sistemleri Yardımıyla Trafik Kazalarının Analizi: Antalya Örneği*, Master Thesis, Selçuk University, Graduate School of Natural Sciences, Konya-Turkey. 135 p.
- Geymen, A. and Dedeoğlu, O.K., 2016, "Coğrafi Bilgi Sistemlerinden Yararlanılarak Trafik Kazalarının Azaltılması: Kahramanmaraş İli Örneği", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 6 (2), pp. 79-88.
- Grimshaw, D.J., 1994, *Bringing GIS into Business*, Longman, London-England.
- Gündoğdu, İ. B., 2010, "Applying Linear Analysis Methods to GIS-Supported Procedures for Preventing Traffic Accidents: Case Study of Konya", *Safety Science*, Vol. 48/6, pp. 763-769.
- Kabakuş, N., Tortum, A. and Çodur, M.Y., 2012, "Erzurum'un İlçelerinde Meydana Gelen Trafik Kazalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Değerlendirilmesi", *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknik Dergisi*, Vol. 2(2), pp. 78-92.
- Nizam, T., Erkenekli, F., Çodur, M.Y., Uluğtekin, N., Doğru, A.Ö., "Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Trafik Kaza Analizi", *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Antalya-Turkey, 5, 2011.
- Reshma, E.K., Sharif, S.U., 2012, "Prioritization of Accident Black Spots Using GIS", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol.2(9), pp. 117-122.

## INVESTIGATION OF SPATIAL ACCURACY OF HIGH-RESOLUTION (50cm) WORLDVIEW-2 SATALLITE IMAGES

<sup>1</sup>Ömer MUTLUOĞLU, <sup>2</sup>Murat YAKAR, <sup>3</sup>Hacı Murat YILMAZ

<sup>1</sup> School of Technical Science, Architecture and Urban Planning, Selcuk University, Konya, Turkey

<sup>1</sup>Selcuk University, Engineering Faculty, Department of Geomatics Engineering, Konya, Turkey,

<sup>3</sup>Aksaray University, Engineering Faculty, Geodesy and Photogrammetry Department, Aksaray, Turkey

<sup>1</sup>omutluoglu@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>yakar@selcuk.edu.tr, <sup>3</sup>hmyilmaz@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 22.08.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.10.2016)

**ABSTRACT:** Nowadays, Very High Resolution Satellite (VHRS) images have been used for many applications intensively. Using of the digital satellite images in relevant approaches may give more accurate ideas about the researched fields. Besides, different methods could be used for geospatial informations from relevant digital data in many disciplines. The most importance reason of using the maps, which are derived from VHRS images, is accuracy of data. To obtain maps from VHRS images or use VHRS images as map, the VHRS images require rectification. For an accurate rectification process, Ground Control Points (GCPs) must be marked in the field. In this study, spatial accuracy of the stereo WorldView-2 satellite image (0.5 m resolution) was investigated at a test area. For this, 31 GCP points were established. These points were used as controls and check point. Block adjustment was made using a different number of control and check points. The impact of the number of control points upon the adjustment results was also investigated. As a result of adjustment using a 5-point control and 26 check points; root mean square error in the 53 cm x direction, 17 cm y direction, 63 cm in z-direction for control points have been obtained. For check points, 55 cm x direction, 26 cm y direction and z direction 65 cm root mean square error were found. Also coordinates obtained from the stereo model and the field determined by the geodetic methods coordinates of points were compared. The average position error of a point is 48 cm according to comparison results.

**Key Words:** WorldView-2, Ground control point, Check Point, Rectification, Resolution, VHRS

### WORLDVIEW-2 ( 50 cm ) Uydu Görüntüsünün Konumsal Doğruluğunun Araştırılması

**ÖZ:** Günümüzde çok yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri pek çok uygulamada yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Amaca uygun yaklaşımlarla sayısal uydu görüntüleri kullanımı, araştırılan alan hakkında çok doğru fikirler verebilir. Bunlara ilave olarak, birçok disiplin konumsal bilgi için ilgili sayısal verleri kullanmada farklı yöntemler kullanılabilir. Yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden üretilen haritaların kullanılmasının en önemli sebebi verinin doğruluğudur. Yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden haritaları elde etmek ya da yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerini harita gibi kullanmak için yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri düzeltme gerektirir. Doğru düzeltme işlemi için arazide yer kontrol noktaları işaretlenmelidir. Bu çalışmada; bir test alanında stereo Gökürk-2 uydu görüntüsünün ( 0.5 m çözünürlüklü ) konumsal doğruluğu araştırılmıştır. Bunun için 31 yer kontrol noktası işaretlenmiştir. Bu noktalar kontrol ve denetleme noktası olarak kullanılmıştır. Farklı sayıda kontrol ve denetleme noktası kullanılarak blok dengeleme yapılmıştır. Kontrol nokta sayısının dengeleme sonuçlarına etkisi de araştırılmıştır. 5 kontrol noktası ve 26 denetleme noktası kullanılarak yapılan dengeleme sonucunda; kontrol noktaları için x yönünde 53 cm, y yönünde 17 cm, z yönünde 63



cm karesel ortalama hatalar elde edilmiştir. Denetleme noktaları için x yönünde 55 cm, y yönünde 26 cm ve z yönünde 65 cm karesel ortalama hatalar bulunmuştur. Ayrıca, stereo modelden okunan koordinatlarla ve jeodezik yöntemle elde edilen nokta koordinatları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre bir noktanın ortalama konum hatası 48 cm'dir.

**Anahtar Kelimeler:** *WorldView-2, Yer control noktası, Denetleme noktası, Rektifikasyon, Çözünürlük, Çok Yüksek Çözünürlüklü Uydur Görüntüsü*

## INTRODUCTION

High resolution satellite images, as less than 1 m. resolution are used in many fields such as updating existing maps, land use mapping, urban planning, disaster monitoring, and so on. To use high resolution satellite images in such fields, they have to be rectified. Rectification process is done by points whose coordinates are known in both land and image. These determined points may be the marked points in the field or visible points in images may be measured in the field. Sometimes, these points may represent; road cross, painting objects, etc. Points which are set up in the field are either acquired from existing maps or from image matching the research site or geodetic surveys.

In this study, the spatial accuracy of the stereo WorldView-2 satellite image established on a test area was investigated. High-resolution satellite images (IKONOS, QuickBird, GeoEye-1, WorldView-1-2, etc.) spatial correction, adjustment blocks in the rectification process of the used model and GCP have been investigated in many publications.

Acquisition of ground control points (GCPs) is particularly importance for spatial correction of high resolution satellite images. The commercial high resolution satellite image can be accurately rectified using the combination of bias-corrected rational polynomial coefficients (RPCs) and ground control points (GCPs). With a few precisely measured GCPs accurate three dimensional measurements can be made from the base level Ikonos data product. However, the accuracy of the results is dependent on the precision of the GCPs (Dare et.al, 2002).

In the article of Grodecki and Dial (2003), detailed information about the block adjustment of high-resolution satellite imagery use of the RPC model can be found.

The control points could be acquired by three different methods for spatial correction in two and three dimensional of high resolution satellite images. These are GCPs from existing maps, GCPs set up in land, GCPs from image matching.

Kadota and Takagi (2002) had used above mentioned methods in acquisition of GCPs for spatial correction of high resolution satellite image. They had achieved best result with surveyed GCPs.

Dial and Grodecki (2003) had tested Ikonos stereo accuracy without ground control point. They had achieved absolute accuracy at 6.2 m. horizontal, 10.1 m. vertical, and found out the most relative accuracy results for points more than 3 meters.

Hanley and Fraser (2001) had used ground surveyed GPS points and ground control measured from the orthomosaic for two dimensional spatial correction of high resolution satellite images. They had achieved similar results from both surveyed GPS points and orthomosaic points.

Dare et. al. (2002) had used ground measured from GPS points and orthomosaic GCPs for three dimensional correction of high resolution satellite images. They had also achieved similar results from both surveyed GPS points and orthomosaic points. The spatial corrections by using GCPs surveying in land may give most accurate results.

WorldView-2 satellite image geo-referencing accuracy of the impact point of the analysis and distribution were studied (Wang and Gruen, 2012). Ke (2006) has made the experimental study of the process of orthorectification accuracy in the analysis of images VHRS. GCP properties (shapes, distribution, the accuracy, number of GCPs) were examined. Yilmaz et al. (2004) have researched available GCPs dimensions for IKONOS satellite imagery.

Mutluoglu et al. (2012) carried out a study about the appropriate sizes of GCPs on worldview-2 satellite images.

The effect of distribution of control points at the terrain has seen to be more effective than the effect of number of control points upon the adjustment results (Mutluoglu et al. 2014).

Yakar et al. (2006) have investigated to determine registration outside areas of via satellite images.

## WORLDVIEW-2 SATELLITE

The WorldView-2 (WV-2) satellite, launched by DigitalGlobe on Oct 8 2009 represents the first commercial imaging satellite to collect very high spatial resolution data in 8 spectral bands (Padwick et al. 2010). The images provided by the satellite can be used for applications such as mapping, land planning, disaster relief, exploration, defense and intelligence, visualization and simulation of environments and classification. Worldview- 2 can operate at an altitude of 770km with an inclination of 97.2° for a maximum orbital period of 100 minutes. WorldView-2's large-area collection capabilities and rapid retargeting are two important features of the satellite. WorldView-2's advanced geospatial technology provides significant improvements in accuracy. The accuracy specification has been tightened to 6.5m CE90 directly right off the satellite, meaning no processing, no elevation model and no ground control, and measured accuracy is expected to be approximately 4m CE90.

WorldView-2 panchromatic resolution is 46cm and multispectral resolution is 1.8m. Distribution and use of imagery better than 0.50m GSD pan and 2.0m GSD multispectral is subject to prior approval by the U.S. Government. As the first high-resolution commercial satellite to provide eight spectral bands, WorldView-2 offers imagery with a high degree of detail, unlocking a finer level of analytical discernment that enables improved decision-making. In addition to industry-standard blue, green, red and near-infrared, WorldView-2 includes four previously unavailable bands, collected at 1.8m resolution: coastal blue, yellow, red edge and near-infrared 2. These bands offer a range of benefits to analysts, who will be able to identify a broader range of classification, (e.g. more varieties of vegetation or water-penetrated objects), to extract more features (e.g. cotton-based camouflage from natural ground cover), to view a truer representation of colors that match natural human vision, and to track coastal changes and infractions (Cheng and Chaapel, 2010, URL1).

## MATERIAL AND METHOD

### Test Area

A (15kmx14km) test area has created at surround of Konya Selcuk University Alaeddin Keykubad campus area. Application area of South and South East parts consist of the plains, Northern, North Eastern and North Western part consists of mountainous terrain. In the test area, outside the residential areas of land consist of agricultural areas and bare land. There is not height vegetation (height trees, forest). In the test area, the elevations are changing between 1000 m. and 1700 m. Frame area remain among the following geographic latitude and longitude are given in Table 1.

**Table 1.** Geographic coordinates of test area

	latitude	longitude
Upper left corner	38°04'44"	32°25'08"
lower right corner	37°56'46"	32°34'40"



### WorldView-2 Data

In this study, dated July 9, 2013, stereo worldview-2 (WV-2) satellite pansharpened images are used. With images (Rational Polynomial Coefficients) RPCs files are also obtained.

RPC metadata files contain orbital parameters of the satellites (orientation, height, etc.). RPC metadata files have provided model data of cameras and used in most software packages for 3D photogrammetric production of detail, digital elevation models and orthorectified imagery. Satellite image of the test area in Figure 1 is seen. The technical characteristics of WV-2 image taken are given in Table 2.



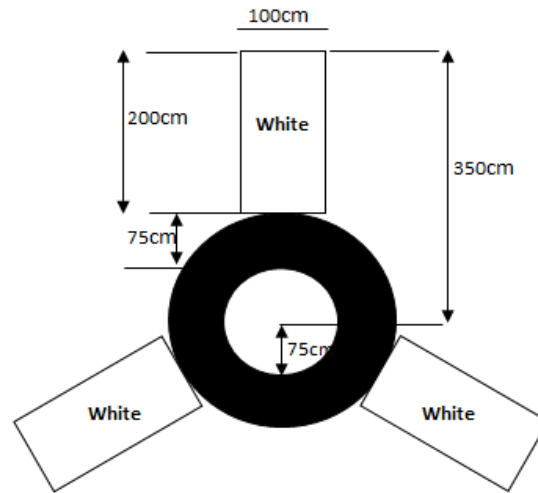
Figure 1. a) first image, b) second image

Table 2. The technical characteristics of WV-2 image taken

Parameters	WV-2 First scene	WV-2 Second scene
<b>imageDescriptor</b>	StereoOR2A	StereoOR2A
<b>productType</b>	Stereo	Stereo
<b>bitsPerPixel</b>	16	16
<b>outputFormat</b>	GeoTIFF	GeoTIFF
<b>scanDirection</b>	Forward	Forward
<b>firstLineTime</b>	09.07.2013 08:59:11.22850	09.07.2013 09:00:16.428479
<b>meanSunAz</b>	138.2 (degree)	138.8 (degree)
<b>meanSunEl</b>	70.4	70.5
<b>meanSatAz</b>	46.8	157.7
<b>meanSatEl</b>	68.4	68.8
<b>MeanInTrack ViewAngle</b>	15.3	15.7
<b>MeanCrossTrack ViewAngle</b>	11.9	10.2
<b>MeanOffNadir ViewAngle</b>	19.3	18.6
<b>cloudCover</b>	0	0
<b>productGSD</b>	0.50m	0.50m

### Office and Field Studies

First of all; location of GCPs have been selected on the 1/25000 scaled map. Nonresidential places have been selected for GCP. The aim of this is prevent of GCP from the destroying and, secondly to use for other different studies. Steel Frame has been made for the GCPs. Selected GCPs have been set up using of steel frame poured concrete on the field. GCPs have been painted white and black according to measurements below (Figure 2). GCPs and satellite images which are marked in the field of view are given in Figure 3.



**Figure 2.** Dimensions of GCP



**Figure 3.** a) The GCP on the field, b) The GCP on the image

In addition, GCPs are marked with calcareous at difficult to reach areas and certain details are selected at settled areas. GCPs coordinates were measured by the method of CORS-TR.

Dual frequency Ashtech Promark 500 GNSS receiver was used at measurements. Sub 10 cm position accuracy with dual-frequency receiver can be obtained. Measurements are made in the two sessions and average values are calculated. Obtained coordinates are at ITRF system. The details of CORS-TR can be found in the articles of Yıldırım et al. (2007) and Kahveci (2009).

Erdas LPS software was used for the evaluation of satellite image. 31 GCPs were used at block adjustment. For the suitable purpose of the study, first of all, suitable numbers and suitable distributed GCPs are used, then the number of suitable distributed points was reduced and reduced GCPs were transformed into check points.

The average error according to the results of block adjustment were given in Table 3. Initially, 31 GCP points were used at adjustment as a control points. Then, adjustment was made using different number of control points. The other reduced points were accepted as a check points. The average errors in the

control points changed from 32 cm to 61 cm, in x direction errors from 6 cm to 23 cm in y direction errors, from 25 cm to 73 cm in z direction errors. The average errors in the check points changed from 39 cm to 57 cm in x direction errors, from 26 cm to 32 cm in y direction errors, from 27 cm to 71 cm in z direction errors.

**Table 3.** Calculated average errors according to x,y,z directions using different numbers control and check points

Number of point		Control Point RMSE(cm)			Check Point RMSE(cm)		
Control	Check	mx	my	mz	mx	my	mz
31	0	34	23	25	0	0	0
26	5	34	21	27	48	32	27
21	10	32	21	30	43	28	29
16	15	35	16	30	39	30	37
11	20	33	19	35	48	27	47
6	25	49	6	55	50	32	62
5	26	53	17	63	55	26	65
4	27	61	8	73	57	30	71

When the 31 control points on the image were used at block adjustment,  $m_{xy} = 41$  cm was obtained and when 5 control points were used at block adjustment,  $m_{xy} = 56$  cm was obtained. According to the results here, the use of too many control points did not affect internal accuracy. Establishing too much points to working field meant an increase in cost and time loss. Namely the establishment of 5 control points at an appropriate distribution and making the exterior orientation process according to these five points appeared to be sufficient (Mutluoğlu et al. 2014). In another study carried out, with 10 GCPs spatial correction of WorldView-2 satellite image has been conducted and root mean square errors has been calculated as 45 cm in x direction, 66 cm in y direction (Hobi and Ginzler, 2012).

In addition to; 48 feature point coordinates have been manually measured from stereo model (Figure 4).



**Figure 4.** Manuel measurement of feature point coordinates.

The coordinates of the same point determined by geodetic methods and comparisons have been made. In comparison, the coordinates determined with geodetic method were used as a reference. The following formulas used in the comparison, and the results are given in Table 4.

$$V_Y = Y_G - Y_K \quad (1)$$

$$V_X = X_G - X_K \quad (1)$$

$$m_x = \pm \sqrt{\frac{[V_X V_X]}{n}} \quad (2)$$

$$m_y = \pm \sqrt{\frac{[V_Y V_Y]}{n}} \quad (3)$$

$$m_p = \pm \sqrt{\frac{[V_X V_X + V_Y V_Y]}{n}} \quad (4)$$

In this equations;

$Y_K, X_K$  : reference coordinates which are measured geodetic methods

$Y_G, X_G$  : Manually measured coordinates from stereo model

$m_x$  : X rmse

$m_y$  : Y rmse

$m_p$  : Average positioning error

n : Number of points

**Table 4:** Comparing the results obtained from stereo model coordinates and geodetic method coordinates

position	Comparative results (cm)							
	Vy min	Vy max	Vx min	Vx max	My	Mx	Mp	Point number
feature	-56	84	57	109	32	36	48	48

**CONCLUSION**

In this study dated in 9 July, 2013 0.5 resolution, stereo WoldView-2 pansharpened images have been used. One of the widely used areas of VHRS is producing and updating of maps. For this , well-distributed GCPs have been established and coordinates have been measured with CORS-TR. To use as a map of VHRS images, spatial correction should be done certainly. Rectification process can be done without GCPs but using GCPs increases the accuracy of rectification. Numbers, distribution, shape and spatial accuracy of GCPs have an effect on the rectification accuracy.

Time, cost and accuracy are important factors at map production. If GCPs are marked more than needed, it means it increases time and cost. This study has shown that rectification can be achieved at high accuracy with RPCs model and using suitable distribution of GCPs (4 or 5 GCPs).

Before taking satellite images, it is always useful to establish GCP at field in appropriate distribution and appropriate sizes. If GCP establishment is not done previously, it is difficult to determine GCP especially non-residential areas on image. At the end of this study, average position accuracy has been calculated as 48 cm. This calculated average positioning accuracy is near drawing accuracy in 1/2500 scaled-map accuracy. WorldView-2 satellite image whose spatial correction was made can be used in updating many maps, following the changes in the GIS, in the study of land-use planning and so forth. For a definitive decision about the geometrical accuracy of the WorldView-2 satellite image, studies should be made on the terrains having different features (residential, mountains, plains, etc.).

**ACKNOWLEDGMENT**

The authors wish to acknowledge for the cooperation and the financial assistance given by the Scientific Research Found (BAP) of Selcuk University.

**REFERENCES**

Cheng, P., Chaapel, C., 2010, "Pan-sharpening and Geometric Correction WorldView-2 Satellite", GEOInformatic June 2010, pp. 30-33.

Dare, P., Pendlebury, N., Frase, C., "Digital Orthomosaics as a Source of Control for Geometrically Correction High Resolution Satellite Imagery", Proceedings of the 23rd Asian Conference on Remote Sensing, Kathmoandu, Nepal, No. 173, 25-29 November 2002.

Dial, G. and Grodecki J., "Ikonos Stereo Accuracy Without Ground Control", ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, Anchorage, Alaska, May 2003.

- Grodecki, J., Dial, G., 2003, "Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.69 (1), pp.59-68, January 2003.
- Hanley, H. B. And Fraser C. S., 2001, "Geopositioning Accuracy of Ikonos Imagery; Indications from 2D Transformations", *Photogrammetric Record*, Vol. 17 (98), pp. 317-329.
- Hobi, L.M., Ginzler, C., 2012, "Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on WorldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data", *Sensors*, Vol. 12 (5), pp. 6347-6368.
- Kadota, T. and Takagi, M., "Acquisition Method of Ground Control Points For High-Resolution Satellite Imagery", *Proceedings of the 23rd Asian Conference on Remote Sensing*, Kathmoandu, Nepal, No. 173, 25-29 November 2002.
- Kahveci, M., 2009, "Gerçek Zamanlı Ulusal Sabit GNSS (CORS) Ağları ve Düşündürdükleri", *HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, Vol. 2009/1 Sayı 100, pp.13-20.
- Ke L. C., 2006, "Orthorectification Accuracies of VHRS Imagery Under the Characteristics of Ground Control Points", *International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences (GIS-IDEAS) 2006*, Ho Chi Minh City, Vietnam. 9-11 November 2006.
- Mutluoglu, O., Yakar, M., Yilmaz, H.M, 2014, "Investigation Of Spatial Accuracy Of High-Resolution (50cm) WORLVIEW-2 Satellite Images", *Scientific Research Found (BAP) of Selcuk University* (poject number 10401092).
- Mutluoglu, O., Yakar, M., Yilmaz, H., M., 2012, "The Most Suitable Sizes Of Ground Control Points (Gcps) For World View2" *FIG Working Week 2012 Knowing To Manage The Territory, Protetect The Environment, Evaluate The Cultural Heritage Rome, Italy*, 6-10 May 2012.
- Mutluoglu, O., Yakar, M., Yilmaz, H.M., 2015, "Investigation of Effect of The Number of Ground Control Points and Distribution on Adjustment at WorldView-2 Stereo Images" *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, IJAMEC*, 2015, Vol. 3(1), pp. 37-41 *Advanced Technology and Science ISSN: 2147-8228/2147-6799 www.atsscience.org/IJAMEC*.
- Padwick, C., Deskevich, M., Pacifici, F., Smallwood S., "WorldView-2 Pan-sharpening", *ASPRS Annual Conference 2010*, San Diego, California, 26-30 April 2010.
- URL1: [www.DigitalGlobe.com\\_Core\\_Imagery\\_Product\\_Guide](http://www.DigitalGlobe.com_Core_Imagery_Product_Guide) (Acces April, 2010 ).
- Wang, T, Gruen, A., "Georeferencing Accuracy Analysis of WorldView-2 and IKONOS Images of Singapore Based on RPFs", *The 33 rd Asian Conference on Remote Sensing, ACRS 2012*, Pattaya, Thailand, 26-30 November 2012.
- Yakar, M., Mutluoğlu, Ö., Çay, T., İşcan, F., Yıldız, F., Yılmaz, H.M., "Inspection of Outside-Registration-Areas Via Ikonos Satellite Images", *Fifth Intenational Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days*, Berlin , 28-31 March 2006.
- Yıldırım, Ö., Bakıcı, S. Cingöz, A., Erkan, Y., Gülal, E. Dindar, A. A., 2007, "TUSAGA-AKTİF (CORS TR) Projesi ve Ülkemize Katkıları", *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, KTÜ, Trabzon*, 30 Ekim -02 Kasım 2007.
- Yilmaz, H.M., Yakar, M., Mutluoglu, O. Yildiz, F., "Selection of The Most Suitable Sizes of Ground Control Points in The Satellite Images", *ISPRS Congress Istanbul*, 12-13 July 2004.

## MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RECYCLED TIRES IN CONCRETE

<sup>1</sup>Mehmet Alpaslan KÖROĞLU

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan University, Engineering & Architectural Faculty, Konya, TURKEY

<sup>1</sup>makoroglu@konya.edu.tr

(Geliş/Received: 21.07.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.10.2016)

**ABSTRACT:** Waste tires have been an increasing problem every year due to the increase of vehicle sales. The disposal of waste tires has presented very serious problems to the human community in the world. Currently, some research has been studied on not only waste tire chips (WTC) but also recycled steel tire fibres (RSF) in concrete. Present study is focusing on the usage of WTC and RSF in concrete mixture. The different weight of WTC and RSF is mixed in concrete in order to investigate the effect on mechanical properties. By adding WTC and RSF obtained a satisfactory improvement on cracking control, compressive strength, flexural strength and also tensile strength. Moreover, compressive, flexural and tensile strength was positively affected by the addition of WTC and RSF for some mixtures. More percentage of weight fractions added gives high result in tensile strength. However, the workability of the concrete reinforced with both WTC and RSF was negatively affected.

**Key words:** Waste steel fiber, Waste tire chips, Concrete, Compressive strength, Flexural strength

### Beton İçindeki Geri Dönüştürülmüş Araç Lastiklerinin Mekanik Özellikleri

**ÖZ:** Araç satışlarının artmasıyla birlikte atık lastikler artan bir problem olmaya başladılar. Atık lastiklerin ortadan kaldırılması insanlar için ciddi problemler ortaya çıkarmaktadır. Günümüzde sadece atık lastik parçalarının (WTC) betonda kullanım değil, atık lastik tellerinin (RSF) de betonda kullanımı araştırılmaktadır. Bu çalışma WTC ve RFS atıklarının beton içinde kullanımını araştırmaktadır. Farklı oranlardaki atıkların betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmektedir. Betona lastik atıklarının katılmasıyla çatlak kontrolünde, basınç dayanımında eğilme ve çekme dayanımlarında iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Ayrıca, eğilme çekme dayanımların WTC ve RFS atıklarının katkısıyla pozitif olarak etkilendiği görülmüştür. Atıkların yüzde olarak fazla eklenmesiyle çekme dayanımının artmıştır. Ancak, hem WTC hem de RFS atıklarının ilavesiyle işlenebilirlik negatif olarak etkilenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Atık çelik fiber, Atık lastik, Beton, Basınç dayanımı, Eğilme dayanımı

### INTRODUCTION

In Turkey, studies in the field of waste management have indicated a significant development especially in the last decades, with expanding social and political sensitivity. Since disposal of waste tires has been a major problem for urban areas all around the world, a hard intensive work is being done in order to recycle waste tires. In general, decomposing waste tires by burning process is presumed as the economical and simple way (Siddique and Naik, 2004). However, the pollution owing to very large quantity of smoke including CO<sub>2</sub> makes burning waste tires so unacceptable which is also banned by law in many countries (Gesoğlu et al., 2006). So, innovative processes that are economic and environmental friendly have been developed in order to recycle waste tires.

DOI: 10.15317/Scitech.2016.62

Recycling waste tires into civil engineering applications has been obtaining gradually more concerns particularly into asphalt paving mixtures and concrete over the years. Therewithal, other existing practices for recycling waste tires in civil engineering applications are also benefiting tires as lightweight fillers and using whole tires as crash barriers, bumpers and artificial reefs (Shu and Huang, 2014).

Using recycled tires in Portland cement concrete (PCC) has been limited compared to the applications in asphalt paving mixtures because of the negative effect on compressive strength (Huang, et al., 2004). Waste tire rubber chips are used in concrete in place of coarse or fine aggregate with the size ranges from rubber chips (25 mm to 50 mm) to crumb rubber powders (4.75 mm to 0.075 mm).

Topcu (1995) studied the size and amount of tire rubbers on the mechanical properties of concrete. He obtained that the plastic capacity was improved in spite of the compressive strength was decreased. Eldin and Senouci (1993) researched the strength and toughness of concrete with a percent of coarse aggregates displaced with recycled tire chips. The compressive strength and split tensile strength were decreased as the toughness and ability to absorb fracture energy were developed. Lee et al., (1998) studied the flexure and impact strength of crumb rubber-filled concrete. They obtained that crumb rubber-filled concrete had more flexure and impact strength when compared with conventional Portland cement concrete and latex-modified concrete.

Steel fibers are the component separated from rubber by mechanical processes can be used in concrete in order to improve the performance of concrete including ductility, post-cracking behaviour and impact resistance. Using steel fibers separated from rubber would be a good alternative to enhance more economical, environmental friendly and mechanically improved.

Neocleous et al., (2004), Tlemat et al., (2004), (Tlemat et al., 2006a) and (Tlemat et al., 2006b) carried out that steel fibres recovered from waste tires (RSF) can be successfully used to prepare fiber-reinforced concrete (FRC) They studied the pull-out behaviour and the flexural strength of concrete reinforced with recycled steel fibers, industrial steel fibers and pyrolysed RSF recycled steel fibers. Also new tensile stress-strain model to predict the flexural resistance of concrete reinforced with conventional and recycled steel fibers was proposed.

The aim of this study is to investigate the mechanical performance of concrete with waste tire chips and steel tire fibers. By using waste tire chips and waste steel fibers in structural concrete, a number of specimens were prepared. In this way, compressive, tensile and flexural tests on 28-days age of waste steel fiber reinforced concrete were conducted. This paper represents the results of this experimental study.

## **MATERIALS AND METHOD**

The recycled steel fiber adopted in the present experimental study was supplied by a Turkish private company from Konya, and the crumbing process of waste tires was the one adopted by this company. Both waste tire chips and waste steel fibers were prepared by crumbing and sieved.

### **Material**

Following materials utilized in the present research:

#### **Cement matrix**

Ordinary Portland cement according to TS EN 197-1, CEM I 32.5 R cement was used for every concrete mixture. Raw materials used in this research include cement, fine aggregate (natural river sand), coarse aggregate and tire fibers. Natural river sand with a maximum size of 5 mm, specific gravity of 1.52, SSD water absorption of 1.37%, and SSD density of 2512 kg/m<sup>3</sup> was used in this study. Course aggregate with a max a maximum aggregate size of 15 mm was used. Specific weight of course



aggregate is found as 2690 kg/m<sup>3</sup> and SSD water absorption of 0.6 %. Both natural river sand and course aggregates were batched in a dry condition.

For preparation of all the samples, a water–cement ratio (w/c) of 0.55 (by weight) was used. Table 1 represents the details of the mixture proportions. Since the specific weight of WTC and RSF are different, varied ratio is used for these fibers.

**Table 1.** Concrete mix design

Sample RSF	Sample WTC	Fine Aggregate (gr)	Course Aggregate (gr)	Cement (gr)	Water (gr)	Weight Percent (%)	RSF (gr)	WTC (gr)
0	0	18090	22110	9900	5400	0	0	0
1%	1%	18090	22110	9900	5400	1	555	555
2%	2.5%	18090	22110	9900	5400	2	1110	1387.5
3%	5%	18090	22110	9900	5400	3	1665	2775

All standard steel moulds for cubes, cylinders and prisms specimens has been prepared for oiling the inner surface of the formwork before casting in order to remove the mould after the concrete hardened.

Concrete mixing process was performed to ensure that waste tire chips and steel fibers were distributed uniformly in the concrete mix. In the first stage, all ingredients (cement, fine aggregate, water and course aggregate) were mixed well then after waste tire chips and steel fibers are added gradually.

### Slump Test

In order to obtain workability of fresh concrete mixture slump test is applied to all mixtures (Figure 1). Slump height for the control specimen which is plain concrete is 100 mm. Slump height was decreased since the addition of fiber into concrete mixture. From 1% until 3%, the slump height was decreasing. Slump height is calculated to be 60 mm for 1% of fiber weight, 35 mm for 2% of fiber weight and 10 mm for 3% of fiber weight. And slump height for WTC specimens is calculated to be 70 mm for 1% of fiber weight, 25 mm for 2,5% of fiber weight and 5 mm for 5% of fiber weight. It indicates that the slump of the mixture was decreased when waste tire chips and steel tire fiber content increased.



**Figure 1.** Slump test

The compressive strength test for the cubes was applied at the ages of 28 days. A total of 36 that 18 of WTC and RSF concrete cubes with the dimensions of 150×150×150 mm were prepared. 3 specimens

were prepared for each percentage weight fraction of steel fibers (0.0%, 1 %, 2%, 3 %) and waste tire chips (0.0%, 1 %, 2,5%, 5 %) . ASTM C 109 is used to determine compressive strength for the concrete that is used in this study (Figure 2.).



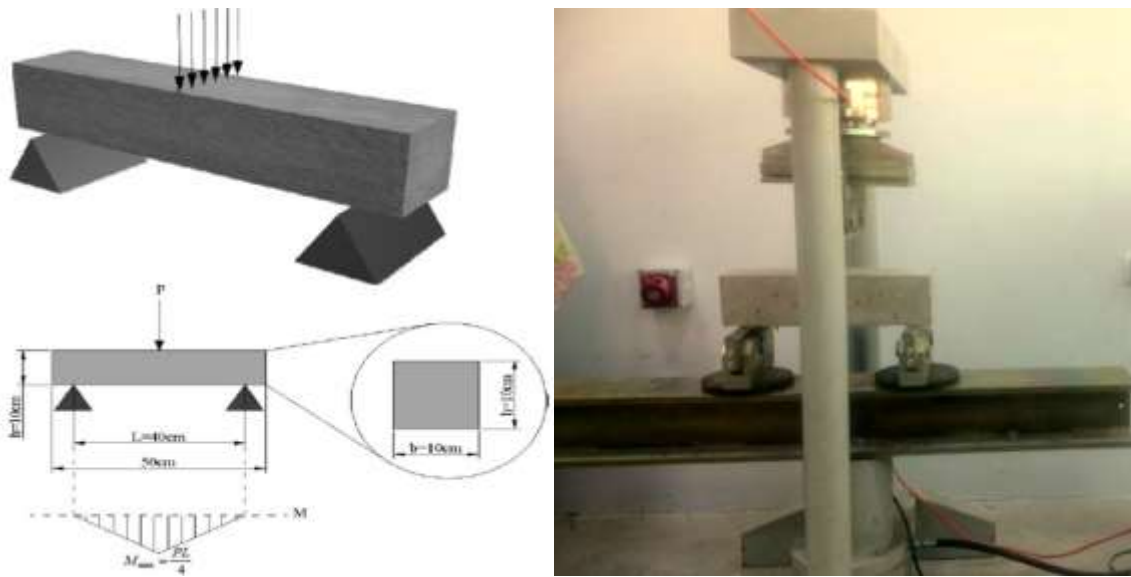
**Figure 2.** Compressive strength test

A total of 3 prismatic specimens with the overall dimensions of 150×150×400 mm were tested for each percentage weight fraction of steel tire fibers (0.0%, 1%, 2%, 3%) and waste tire chips (0.0%, 1 %, 2,5%, 5 %) . The 3 point flexure test was carried out at the age of 28 days with the standard of ASTM D790.



**Figure 3.** Split tensile test

The results of split tensile strength test were based on cylinders with various weight fraction of tire fiber for 28th days. In the course of split tensile strength test, specimens were tested by applying an increasing load throughout the vertical diameter until split failure occurs. Failure of the specimens comes of along its vertical diameter, owing to tension developed in the transverse direction (Figure 3).



**Figure 4.** 3 point loading flexural test

The 100 × 100 × 500 mm specimens were cast instead in order to evaluate the flexural tensile strength of concrete. For all the prism samples, the tests for the determination of the fracture energy were obtained with 3 point bending test (Figure 4).

**RESULTS**

The concrete properties with different weight fraction of RSF are summarized in Table 2.

**Table 2.** Concrete properties with different weight fraction of fibers

Weight of Fiber %	Slump (mm)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
0	100	2210	28.05	2,99	2,36
1 RSF	60	2266	28.74	3,41	2,67
2 RSF	35	2288	30.93	3,78	3,26
3 RSF	10	2315	30.14	3,04	3,14
1 WTC	70	2180	26.58	3,43	2,27
2.5 WTC	25	2153	21.45	3,25	2,09
5 WTC	5	2111	17.09	2,57	1,85

From Table 2. above, the highest average compressive strength is at 2% which is 30.93 MPa of steel fiber weight whereas the lowest strength is at 0% which is 28.05 MPa. Although stress for 3% fiber weight sample is lower than 2% fiber weight sample, the strain is more. Compressive strength for waste tire chips decreasing with weight fraction of tire chips. Flexural strength for weight fraction of tire chips increases for the fraction of 1% and 2.5%. Figure 5 and Figure 6 shows that increasing fiber content also increase ductility of the concrete.

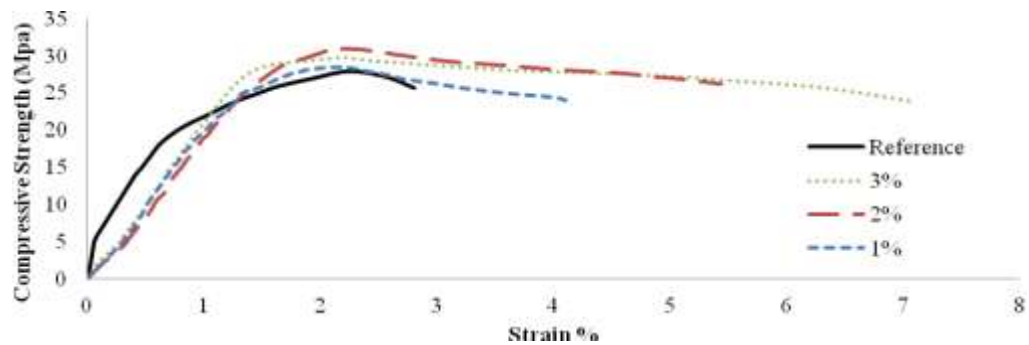


Figure 5. Stress-strain diagram for RSF concrete

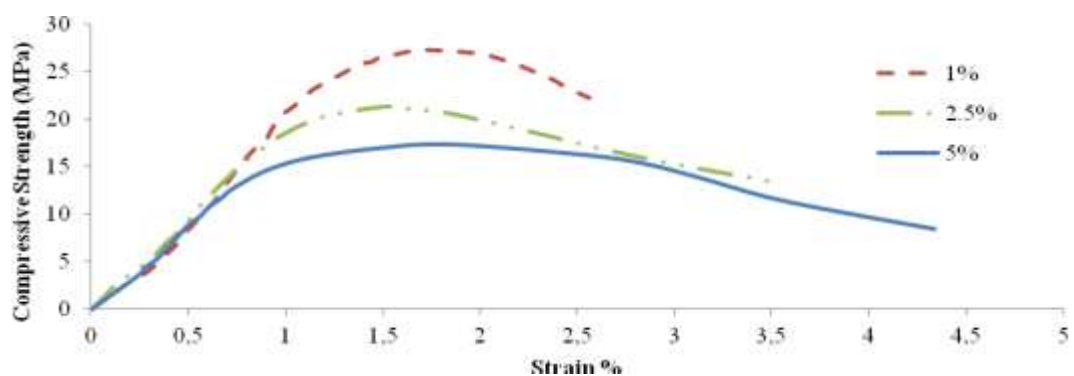


Figure 6. Stress-strain diagram for WTC concrete

Result of tensile strength of the control cylinder is found to be 2.36 MPa and decrease until 3.26 MPa at 2% and increase again at 3% which is 3.14 MPa for steel fibers. It is seen from Table 2., the highest flexural strength is at 2.0% of fibre content which is 3.78 MPa and the lowest strength is at 0% of fibre volume which is 2.99 MPa. Tensile strength for concrete with waste tire chips decreases with weight fraction of tire chips.

The energy dissipation can be calculated by integrating the areas under the load–deflection curves. In this study it is observed that when the fiber contents are increased the area under are increased for both WTC and RSF specimens.

## CONCLUSIONS

This research has proved that the performance of steel tire fiber reinforced concrete is much better compare to conventional plain concrete similarly with the current studies from literature. This experimental study have proved that usage of RSF more than 2% with weight fraction could maintain voids due to insufficient compaction of concrete. However, both concrete compressive and flexural strength may reduce. Therefore it is essential to design the concrete mix by evaluating steel fiber length and ratio. Waste tire chips fiber reinforced concrete has higher flexural strength and ductility. The conclusions from this research based on the experimental results are:

- The test result shows that as the fiber weight of fraction increase the workability for both fibers tend to decrease significantly. Moreover, it can be realized that, the slump test decreases when the weight of fiber increases.
- Waste steel fiber in concrete may be used in order to increase the mechanical properties of concrete. High percentage of weight fraction gives high flexural strength of the concrete. However, when the fraction is more than %2 weight segregation of fiber can decrease strength of concrete.

- The concrete with RSF absorb more energy before and after fail. The recycled tire steel fibers in concrete grips the concrete particles when load is applied on it until failure.
- The crack opening width can be controlled by using RSF in concrete.
- Split tensile test and 3 point flexural test indicate that concrete reinforced with RSF has much greater toughness compared to plain concrete. The cylinder does not split during tensile test since the presence of RSF in concrete. Moreover, concrete prism also does not break into two because of the RSF reinforced in concrete.

## REFERENCES

- Eldin N.N., Senouci A.B., 1993, "Rubber-Tire Practices as Concrete Aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5 (4), pp. 478–496.
- Gesoğlu M., Güneyisi E., Khoshnaw G., İpek S., 2014, "Investigating Properties Of Pervious Concretes Containing Waste Tire Rubbers", *Construction and Building Materials*, Vol. 63, pp. 206-213.
- Huang B., Li G., Pang Su-Seng, Eggers J., 2004, "Investigation Into Waste Tire Rubber-Filled Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16 (3), pp. 187.
- Lee H.S., Lee H., Moon J. S., Jung H. W., 1998, "Development of Tire-Added Latex Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 95 (4), pp. 356–364.
- Neocleous, K., Tlemat, H., Pilakoutas, K., 2004, "Design Considerations on The Use of Steel Fibres from Waste Tyres, as Reinforcement in Concrete", In: *Proceedings of the First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, Liguori Ed., Lecce, Italy, Vol. 1., pp. 611–619, 6-9 June 2004.
- Siddique R., Naik T.R., 2004, "Properties of Concrete Containing Scrap-Tire Rubber – An Overview", *Waste Manage*, Vol. 24, pp. 563–569.
- Shu X., Huang B., 2014, "Recycling of Waste Tire Rubber in Asphalt and Portland Cement Concrete: An Overview", *Construction and Building Materials*, Vol. 67, Part B, pp. 217-224.
- Tlemat H., Pilakoutas K., Neocleous K., "Demonstrating Steel Fibres From Waste Tyres as Reinforcement in Concrete: Material Characterization". In: *Proceedings of the First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, Vol. 1. Liguori Ed., Lecce, Italy, pp. 172–185, 6-9 June 2004.
- Tlemat H., Pilakoutas K., Neocleous K., 2006a, "Design Issues for Concrete Reinforced with Steel Fibres Recovered from Waste Tyres", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 18 (5), pp.677–685.
- Tlemat H., Pilakoutas K., Neocleous K., 2006b, "Stress Strain Characteristic of SFRC using Recycled Fibre", *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 365–377.
- Topcu I.B., 1995, "The Properties of Rubberized Concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25 (2), pp.304–310.

## PERÇİNLİ ÇELİK KÖPRÜ ELEMANLARININ YORULMA ÖMRÜ TESPİTİ ÇALIŞMALARI

<sup>1</sup>Barlas Özden ÇAĞLAYAN, <sup>2</sup>Hudai KAYA

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*  
<sup>2</sup>*Orion Ağır Çelik Yapı Mühendisliği İnşaat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, İSTANBUL*

<sup>1</sup>caglayan@itu.edu.tr, <sup>2</sup>hkaya@orionmuhendislik.com

(Geliş/Received: 13.06.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.11.2016)

**ÖZ:** Çatlak veya çatlak benzeri süreksizlikler birçok mühendislik yapısında hasara neden olan önemli bir olgudur. Bu çatlakların oluşmaması için izlenecek yollardan en önemlisi boyutlandırma sırasında yorulma ile ilgili etkileri göz önüne almak, imalat sırasında da çatlak oluşumuna neden olabilecek detay ve işçilik hatalarından kaçınmaktır. Ayrıca servis hayatı boyunca periyodik olarak yapının muayene edilmesi de gerekmektedir. Buna rağmen, çatlak veya çatlak benzeri süreksizliklerin oluşumu kaçınılmazdır. Bunların varlığını gevrek kırılma ve yorulma açısından değerlendirmek, mühendislerin sorumluluğundadır. 1856 -1866 yılları arasında İzmir Aydın, 1865 yılında İzmir Turgutlu-Afyon, 1873 Haydarpaşa-İzmit, 1888 İstanbul-Edirne, Kırklareli-Alpullu hatlarının yapılmasıyla Türkiye perçinli çelik demiryolu köprüleri ile tanışmıştır. Yapım yılları dikkate alındığında bu köprülerin 100 yaşının üzerinde olduğu, sürekli dinamik yüklere maruz kaldığı ve bunların neticesinde bu tip köprülerde yorulma probleminin ne seviyede olduğunun belirlenmesi ve gerekmesi durumunda önlemler alınması kaçınılmazdır. Bunun için gerekli nümerik yöntemlerin varlığı yanında gerçek boyutlu köprü eleman ve birleşimlerini test edebilecek bir yorulma laboratuvarının ve bu konuda tecrübe kazanmış bir araştırma grubunun varlığı da çok önemlidir. Bu çalışmada, ülkemizdeki perçinli çelik demiryolu köprüleri için başlatılan yorulma deneyleri ve ömür tayin yöntemi anlatılacak ve bu çalışmanın üzerine yapılması gerekli çalışmalar hakkındaki fikirler paylaşılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Perçinli çelik demiryolu köprüsü, Yorulma ömrü, Tam ölçekli test

### Identification of Riveted Steel Bridges' Fatigue Life

**ABSTRACT:** Crack or crack-like discontinuities is an important phenomenon that causes damage in many engineering structures. The most important thing to overcome such formations are to take fatigue into consideration during the design procedure and the manufacturing process that could help avoiding the formation of cracks due to the detail and workmanship. It is also required to be examined periodically throughout the service life of the structure. However, the formation of cracks or crack-like discontinuities are inevitable. Taking into consideration of Their presence in terms of brittle fracture and fatigue is under the responsibility of engineers. By completing the rail line between the years 1856 -1866 Izmir- Aydın, 1865 Izmir Turgutlu-Afyon, 1873 Haydarpaşa-Izmit, 1888 Istanbul-Edirne-Kırklareli-Alpullu, Turkey come across with the riveted steel railway bridges. Considering construction years these are the bridges who are over 100 years old and are subjected to constant dynamic loads. As a result, it is a necessity to determine the level of fatigue damage in this type of bridges, not by doing analytical studies but also by testing full-scale riveted bridge members and their connections. It is obvious, the presence of a fatigue laboratory to test and research group has gained experience in this regard is very important. In this study, started riveted steel railway bridges' member tests in the country



and fatigue life prediction will be described in measure experiments done at Haslab full scale fatigue test laboratory.

**Key Words :** *Revised steel railway bridges, Fatigue life, Full-scale fatigue test*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Demiryolu hatlarımızın 100 yıldan daha uzun bir süredir hizmet verdiği, bu süre zarfında yolcu ve yük taşımacılığının gerek trafik gerekse tonaj olarak arttığı, söz konusu köprülerin proje safhasında hesap edilen yük taşıma kapasitelerinin üzerine etki eden yüklere oranının giderek azaldığı açıktır. Demiryolu hatlarındaki perçinli çelik köprülerin projelendirilme safhasında düşünülen yorulma ömrünü ne kadar tamamladığıysa şu anda cevabı aranan sorudur. Ayrıca Avrupa Birliği ile bütünleşme (entegrasyon) çerçevesinde arttırılacak dingil basıncı için çalışmalar TCDD-İTÜ işbirliği ile başlamış ancak yorulma konusu henüz incelenmemiştir.

Ülkemiz çelik demiryolu köprüleri bu genel yapı içerisinde değerlendirilecek olursa, gerek mevcut yorulma hasar birikimini tespit etmek, gerekse geriye kalan yorulma ömürlerini tayin etmek, serviste kalıp kalmayacaklarına, kalacaklarsa ne şekilde takviye veya kısıtlama gerektireceklerine karar vermek gerekmektedir. Bilindiği üzere, tekrarlı yükler altında, mikro çatlakların makro hale gelmesiyle elemanın taşıma gücünü erken yitirmesi şeklinde tanımlayabileceğimiz yorulma, oldukça düşük gerilmelerde dahi kendini gösterebilmektedir.

Tüm dünyada, gerçek boyutlardaki perçinli elemanlar üzerinde yorulma deneyleri yapılmaktadır. Reemsnyder (1975), yüksek gerilme aralıklarında, perçinli kafes birleşimleri üzerinde çalışmıştır. Out, Fisher ve Yen (1984) , 6 adet perçinli yapma boylama kirişini, 48 ile 69 N/mm<sup>2</sup> gerilme aralığında ve yüksek tekrar sayılarında çalıştırmışlardır. Baker ve Kulak (1985) tarafından gerçekleştirilen testler de ise gerilme aralığı 165 ile 188 N/mm<sup>2</sup> 'de tutulmuştur. Brühwiler, Smith ve Hirt (1990) tarafından, mevcut köprüden alınan üç adet boylama kirişi 60 ile 120 N/mm<sup>2</sup> 'lik gerilmelerde ve yüksek tekrar sayılarında teste tabi tutulmuştur.

Gerek Amerikan Eyalet Karayolları ve Taşımacılık Birliği (AASHTO,1989) gerekse Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği (AREA, 1991, AREMA, 1997) standartlarının ilgili maddeleri, bu tip deneylerden elde edilen verileri kullanarak tespit edilmiştir.

Böyle bir profil içerisinde, perçinli demiryolu köprü elemanlarının yorulma hasar birikimini ve geriye kalan yorulma ömürleri tayininin makul derecede yapılabilmesi amacıyla AASHTO' nun tanımladığı C ve D kategorileri için daha fazla bilgi üretmek, ülkemiz çelik demiryolu köprülerinde yorulmaya sebep olacak kritik gerilme değerini tayin etmek, bu gerilmeleri meydana getiren demiryolu lokomotif ve vagonlarını tespit etmek, dolayısıyla kritik gerilmeye sebep olmayan katar oluşumunu yorulma hasarı hesabında devre dışı bırakmak, elemanların mevcut yorulma birikimlerini belirleyip geri kalan yorulma ömürlerini saptamak, demiryolu köprülerinden başlayarak ülkemizin tüm yapıları için kullanılacak yorulmaya ait bir veri tabanına data üretmek amaç edinilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda, yorulma deneyleri Türkiye' nin ilk Gerçek Boyutlu Taşıyıcı Elemanlar için Yorulma Laboratuvarı HASLAB (Hasar Tespit Laboratuvarı)'da gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvar NATO Science for Stability programınca destekli TU-Bridges "Rehabilitation of old railway bridges" Araştırma Projesi kapsamında, İTÜ Rektörlüğü ile TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü arasında imzalanmış olan işbirliği protokolü çerçevesinde Haydarpaşa' da kurulmuştur.

## Yaklaşım (Approach)

Yüksek tekrarlı (2x10<sup>6</sup> tekrar), büyük numune yorulma deneyleri oldukça iyi bir laboratuvar altyapısı, para ve zaman gerektiren testler olması nedeniyle sık yapılan testler değildir. Günümüz teknolojisiyle bile bir test 1 haftadan çok daha uzun sürebilmektedir. Ancak, yorulma mukavemeti alt

sınırının tanımlanmasındaki yetersiz sayıdaki test verileri nedeniyle mevcut belirsizlikleri yok etmek ve mümkün olduğunca gerçek davranışı ifade edebilmek için uzun süreli ve gerçek boyutlu numunelerin testi, gereklilikten çok günümüz mühendisliği için bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu amaçla, TCDD ile yapılan anlaşma çerçevesinde 1912 ile 1976 yılları arasında hizmet vermiş ancak yol hattının değiştirilmesi nedeniyle şu anda hizmet dışı kalmış Diliskelesi Demiryolu Köprüsü'nden alınacak numuneler üzerinde yorulma testleri yapılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda dörder adet enleme ve boylama kirişlerinin test edilmesi planlanmıştır, bu parçalar yerinde sökölüp test edilmek üzere Haslab yorulma laboratuvarına teslim edilmiştir.

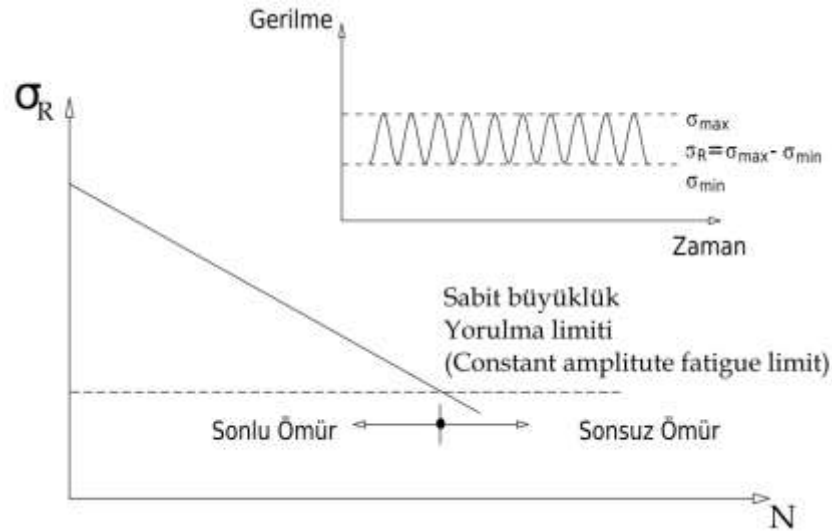
Bununla birlikte, Ankara-İstanbul Demiryolu hattında bulunan ve TU-BRIDGES Araştırma Projesi kapsamında 1992, 1993, 1994 yıllarında test edilen Karaçam, Bekdemir ve Cambazkaya Demiryolu Köprülerinin toplam yorulma hasar birikimleri ve artık yorulma ömürleri, güncellenmiş bilgisayar modelleri (updated computer models) üzerinde, günümüz ve geçmiş katar yük ve trafikleri geçirilerek bulunması kararlaştırılmıştır (Uzgider, 1996).

Söz konusu üç köprünün ilk bilgisayar modelleri orjinal paftaları ve hesap ciltleri esas alınarak üç boyutlu olarak üretilmiş, testlerden alınan kayıtlar doğrultusunda güncellenmiş, gerçek davranışları ifade edebilen nihai modelleri elde edilmiştir. İlgili tüm algoritmalar bu rafine modeller üzerinde uygulanmıştır.

Köprü üzerindeki elemanlarda olabilecek herhangi bir hasarın, trenin raydan kolaylıkla çıkmasına, hatta, söz konusu köprünün tamamıyla kullanılamaz hale gelmesine sebep olacağından, bu elemanların sağlığının köprünün emniyeti açısından önemi açıktır. Özellikle hasar alması durumunda köprünün fonksiyonel işleyişini kaybettirecek elemanlar (boylama, enleme, dikme, alt başlık, üst başlık elemanları gibi), köprüdeki diğer elemanlara göre beher katar başına, nispeten daha fazla gerilme-tekrar sayılarına maruz kalmaları, dolayısıyla yorulma ömürlerinin daha kısa olması başka bir önemli hususu içinde barındırmaktadır.

Elemanların ve bunların perçinli birleşimlerinin yorulma mukavemetlerini ifade etmekte kullanılan ve yukarıda bahsedilen standartlarda da verilen tipik gerilme aralığı-tekrar sayısı eğrisi (S-N Curve) aşağıda verilmiştir (Şekil 1). Logaritmik olmak üzere, düşey eksen gerilme aralığını, yatay eksen ise gerilme tekrar sayısını göstermektedir. Gerilme aralığı, uygulanan maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel farkı olarak tanımlanabilir.

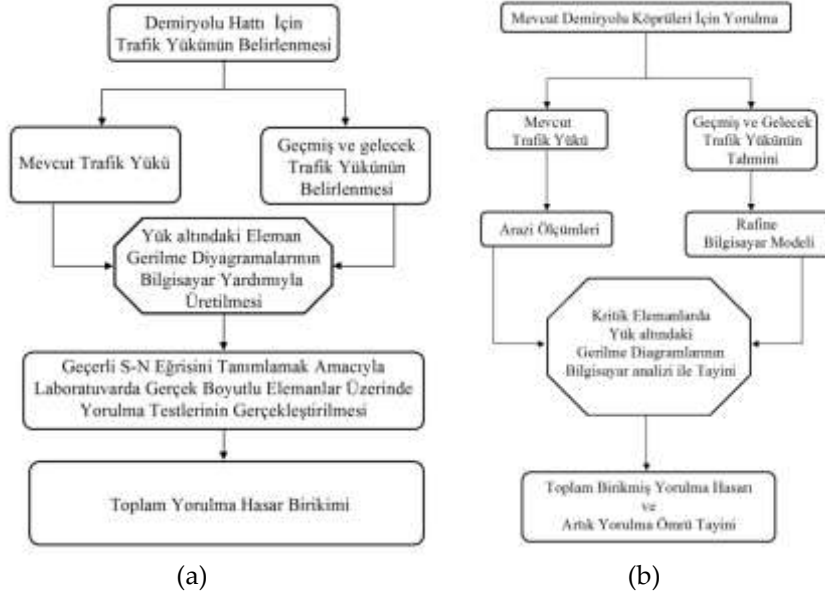
Söz konusu boylama kirişlerde yapılan testler, düşük gerilme aralıklarından başlatılmış (Uzgider ve diğ., 2005), çatlağın oluşmaması durumunda (Run Out) ise uygulanan yük, dolayısıyla gerilme aralığı artırılmıştır. "Run Out" kararı, 8 ile 20 milyon yük tekrar sayısına karşın, kirişte çıplak gözle görülebilir bir çatlağın oluşmaması halinde alınmış ve bu durumda bir önceki sayaç sıfırlanmıştır.



Şekil 1. Karakteristik S-N eğrisi.

Figure 1. Characteristic S-N curve

Laboratuvar deneylerinin yanı sıra, köprünün hizmet verdiği yıllardaki katar tipi, yük ve trafik verileri kullanılarak yükleme modelleri üretilmiş ve yürütülen statik analizler sonucunda boylama kirişler için gerilme tesir çizgileri elde edilmiştir. Bu tesir çizgilerinden hareketle, elemanın yorulma hasar birikimi, J.M. Barsom ve S.T. Rolfe (1987), Miner (1945) tarafından sunulan "Miner Lineer Hasar Birikimi" kuralı yardımıyla tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla birlikte değerlendirilmiştir. Bu sayfalar için kullanılan çalışma algoritması Şekil 2' de sunulmuştur.



Şekil. 2. a) Dil iskelesi için b) Cambazkaya, Bekdemir ve Karaçam Köprüleri için yorulma analizi akış diyagramı.

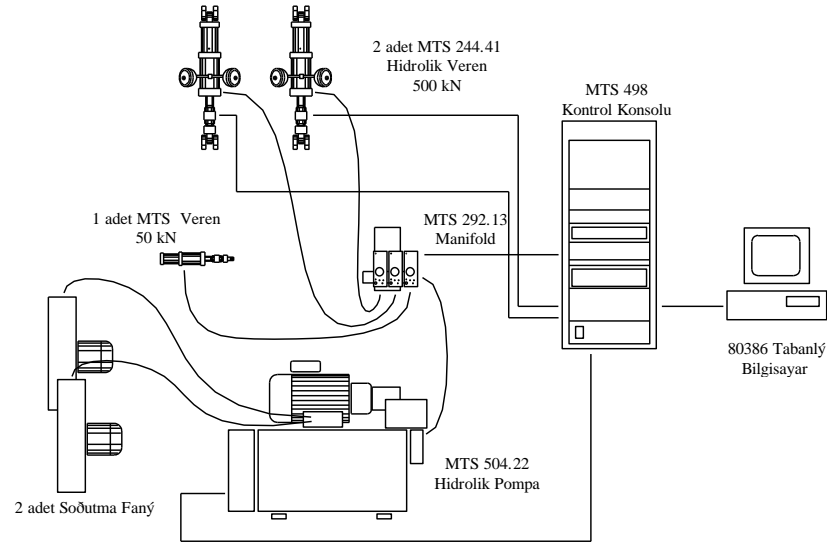
Figure 2. Fatigue analysis flow chart for a) Diliskelesi, b) Cambazkaya Bekdemir and Karaçam Bridges

## GERÇEK BOYUTLU KÖPRÜ ELEMANLARINDA YORULMA TESTİ (FULL SCALE FATIGUE TESTS ON BRIDGE MEMBERS)

### Test Ekipmanı (Test Equipments)

Yorulma deneyleri, Haydarpaşa' da kurulmuş olan büyük numune Yorulma Laboratuvarı HASLAB' da gerçekleştirilmiştir.

Bu laboratuvardır 400 m2 si kapalı olmak üzere toplam 1000 m2 lik alan üzerine kurulmuştur. İçerisinde 125 kN ve 50 kN olmak üzere iki adet yerden kontrollü vinç bulunmaktadır. 120 cm yüksekliğindeki 18m x 8m lik kuvvetli döşemeye mesnetlendirilmiş yükleme çerçevesine bağlı bulunan 2 adet 500 kN' luk, ve ayrıca küçük numune deneylerinde kullanmak üzere 1 adet 50 kN' luk yüksek frekanslı yükleme yapabilen hidrolik veren bulunmaktadır. Tüm bu sistem bilgisayar destekli bir kontrol paneli üzerinden kumanda edilmektedir (bkz Şekil 3).

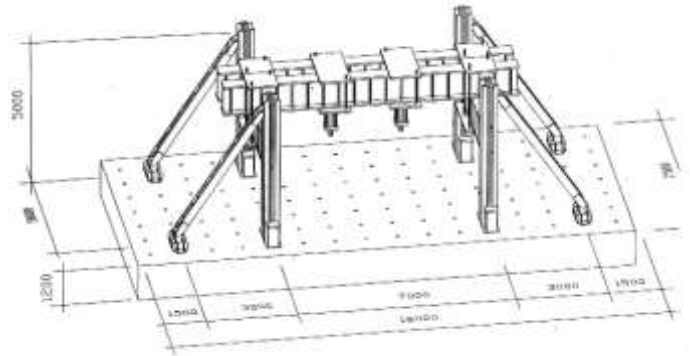


Şekil 3. Yorulma laboratuvarı sistem şeması

Figure 3. Fatigue laboratory system diagram

#### Yükleme Çerçevesi (Loading Frame)

Yorulmaya ömrü sonsuz olarak boyutlandırılmış çerçevenin yapımında 900 kN St37 ve St52 çeliği kullanılmıştır. Çerçeve 18.0x8.0x1.2 m.'lik kuvvetli betonarme döşeme üzerine monte edilmiştir (Şekil 4). Çerçevenin yüksekliği, genişliği ve açıklığı ayarlanabilmektedir.



Şekil 4. Yüklem çerçevesi

Figure 4. Loading frame

#### Test Numuneleri (Test Specimens)

Test edilen numuneler, Diliskelesi Demiryolu Köprüsü' nünden sökülerek laboratuvara getirilen boylama kirişleridir. Kafes kiriş şeklinde inşa edilen köprü, tek hatlı olup, iki açıklıklı basit kiriş tarzındadır. Herbir açıklığı 31.00 m. olan köprü'nün ikinci açıklığı, hattın değiştirilmesinden sonra kaldırılmış, ancak ilk açıklıktaki köprü yerini muhafaza etmektedir. (Şekil 5).

Köprüde kullanılan boylama kirişler NPI475 hadde profili olup Rombach firması tarafından imal edilmişlerdir. Çeliği, Wrought Iron' dır. Elemanlarda yer yer önemli miktarda korozyon tespit edilmiştir.

Elemanlar test düzeneğine yerleştirilmeden önce kumlanmış, tamamen temizlenmiş ve oluşacak muhtemel çatlakların kolayca fark edilip izlenebilmesi için beyaz kireçle boyanmıştır.



**Şekil. 5.** Diliskelesi (perçinli demiryolu) köprüsü  
*Figure 5. Diliskelesi (riveted railway) Bridge*

### Test Düzenegi (Test Setup)

Yükleme 4 noktadan tanımlanmıştır (Four-Point Bending) (Şekil 6), bu amaçla mesnet takımları ve yüklem kirişi ile yanal burkulmaya karşı numuneyi tutacak elemanlar imal edilmiştir ( Şekil 7).

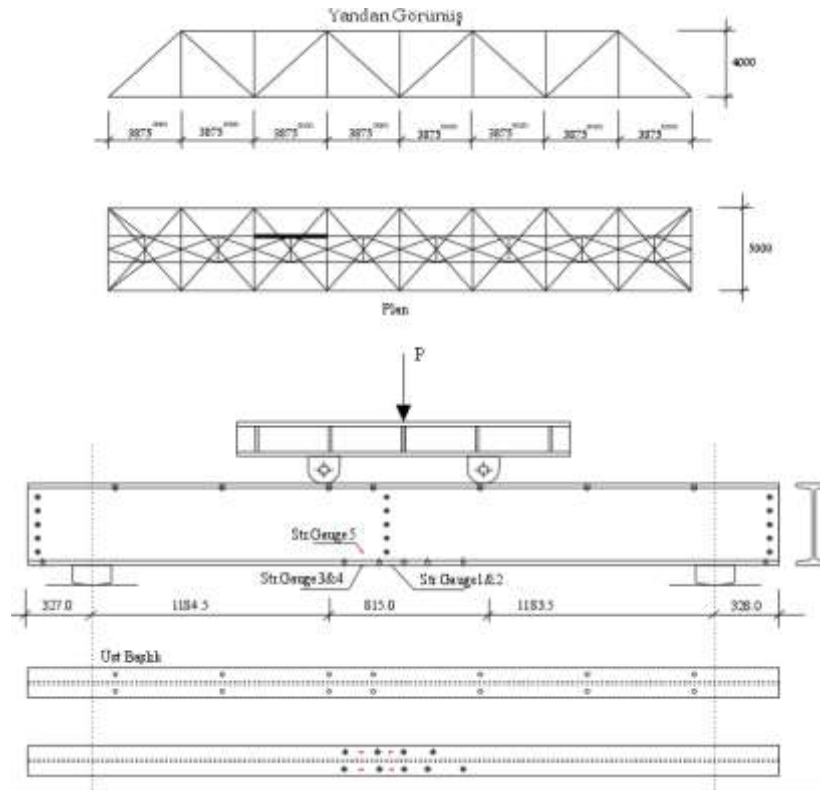
Bu yöntemle, kirişin yük etkileyen noktalar arasındaki orta kısmında sabit moment ve kesme kuvveti etkisi olmaksızın, muhtemel bir yorulma çatlağının oluşacağı bir bölgede, sabit bir gerilme dağılımı elde edilmektedir.

Kontrol paneli üzerinden tanımlanan test yüklem profiline etki ettirilecek yüklerin yanı sıra yük değişim limiti, deplasman limiti ve gerilme limitleri de tanımlanmıştır. Böylece çatlak oluştuğu anda yük, deplasman yada gerilmedeki değişim ile birlikte test otomatik olarak kontrol paneli tarafından durdurulması sağlanmıştır.

Testlerin, şu ana kadar üzerinde fazla çalışılmamış olan düşük gerilme aralıklarından ve yüksek yük tekrar sayılarından başlatılması planlanmış, malzemenin davranışına göre gerilme aralığının yükseltilmesine karar verilmiştir.



**Şekil. 6.** Test düzenegi  
*Figure 6. Test setup*



Şekil 7. Boylama kirişi ve yükle şekli

Figure 7. Longitudinal beam and loading setup

## DİLİSKELESİ KÖPRÜSÜNÜN MODELLENMESİ VE BOYLAMA KİRİŞLER İÇİN YORULMA (MODELING OF DİLİSKELESİ BRIDGE AND FATIGUE CHECK FOR LONGITUTUNAL MEMBERS)

### Yaklaşım (Approach)

Bölüm 2 ve Şekil 2a' da tanımlanan akış diyagramında verilen adımlar takip edilerek yorulma ile ilgili çalışma gerçekleştirilmiştir.

### Demiryolu Hattı için Trafik Yükünün Belirlenmesi (Determining The Railroad Traffic Load)

Diliskelesi Demiryolu Köprüsü' nün hizmet verdiği yıllara ait lokomotif, vagon tipleri ve katar bilgileri, TCDD arşivlerinden elde edilebilen belgeler doğrultusunda tespit edilmiştir. Bu araştırma sırasında, 1912 ile 1976 yılları arasındaki 64 yıl, yükleme tiplerinin farklılığının yanı sıra dönemin ekonomik ve politik etkenleri de göz önüne alınarak 6 farklı zaman dilimine ayrılmış, her dönemin karakteri ve TCDD arşivinden gelen belgeler doğrultusunda katarlar oluşturulmuştur.

### Eleman Gerilme Tesir Çingularının Bilgisayar Yardımıyla Üretilmesi (Optaning The Member Stress Influence Lines By Using Computer)

Diliskelesi köprüsü üzerinden sökülerek getirilen enleme ve boylama kirişlerine öncelik verilerek, köprünün bütün elemanları Bölüm 3.1 çerçevesinde belirlenen katarlar altında gerilme tesir çizgilerini elde etmek amacıyla köprünün 3 boyutlu bilgisayar modeli ve yükleme profilleri hazırlanmıştır. Belirlenen farklı yükleme katarlarının Cosmos\M (1991) sonlu elemanlar programı kullanılarak köprü modeli üzerine yürütülmesi sonucu boylama kirişlerin ve diğer elemanlarının gerilme tesir çizgileri elde edilmiştir.



Bu tesir çizgileri daha sonra Fisher, Yen ve Wang (1987; 1989) tarafından sunulan "Rainflow Counting" işlemine tabi tutularak elemanın bu yükler altındaki gerilme tekrar sayıları elde edilmiştir.

### Gerçek Boyutlu Elemanlar Üzerinde Yorulma Testi (Full-Scale Fatigue Tests)

Değişik laboratuvarlarda şu ana kadar gerçekleştirilmiş olan büyük numune yorulma deneyleri, yüksek gerilme aralıklarında ve düşük tekrar sayılarında yapılmıştır. Bu nedenle, "wrought-iron" ve yumuşak çelik (mild steel) den yapılmış olan perçinli köprü taşıyıcı elemanlarının sabit genlikli yorulma limiti çok belirgin değildir. Yapılacak testlerin çıkış noktası budur.

AASHTO kategori. D ve C yorulma limitlerindeki bu belirsizliği ortadan kaldırabilmek ve bu bölge içinde daha sağlıklı kararlar verebilmek için söz konusu yorulma deneyleri planlanmıştır.

### Toplam Hasar Birikiminin Tayini (Determination Of Cumulative Damage)

Laboratuvar testlerinin tamamlanmasından sonra elde edilen datalarla, bilgisayar modelinin statik çözümünden elde edilen eleman gerilme tesir çizgileri birlikte değerlendirilerek, Miner tarafından 1945 de geliştirilen, J.M.Barsom ile S.T.Rolfe (1987) tarafından sunulan ve "Lineer Hasar Birikimi Teorisi" veya kısaca Miner kuralı olarak bilinen teori yardımıyla toplam hasar birikimi hazırlanan bir yazılım ile hesaplanmıştır.

### Geçmiş Trafiğin ve Katarların Belirlenmesi (Determination of the Past Train Traffic and Wagon Sequences)

Köprünün hizmet verdiği 64 yıl, altı farklı döneme ayrılmıştır:

1912-1922      1923-1937      1938-1949      1950-1964      1965-1969      1970-1976

Bu dönemlere ait TCDD arşivlerinden (Genel Müdürlüğü İstatistik Yıllığı, Tren Sefer ve Katar Bilgileri) elde edilebilen belgelerden de faydalanarak tipik lokomotif, vagon ve katarlar belirlenmiştir.

**Çizelge 1.** Diliskelesi Köprüsü 1912-1976 yılları arası katar geçiş sayıları.

*Table 1. Diliskelesi bridge, 1912-1976 train passage counts*

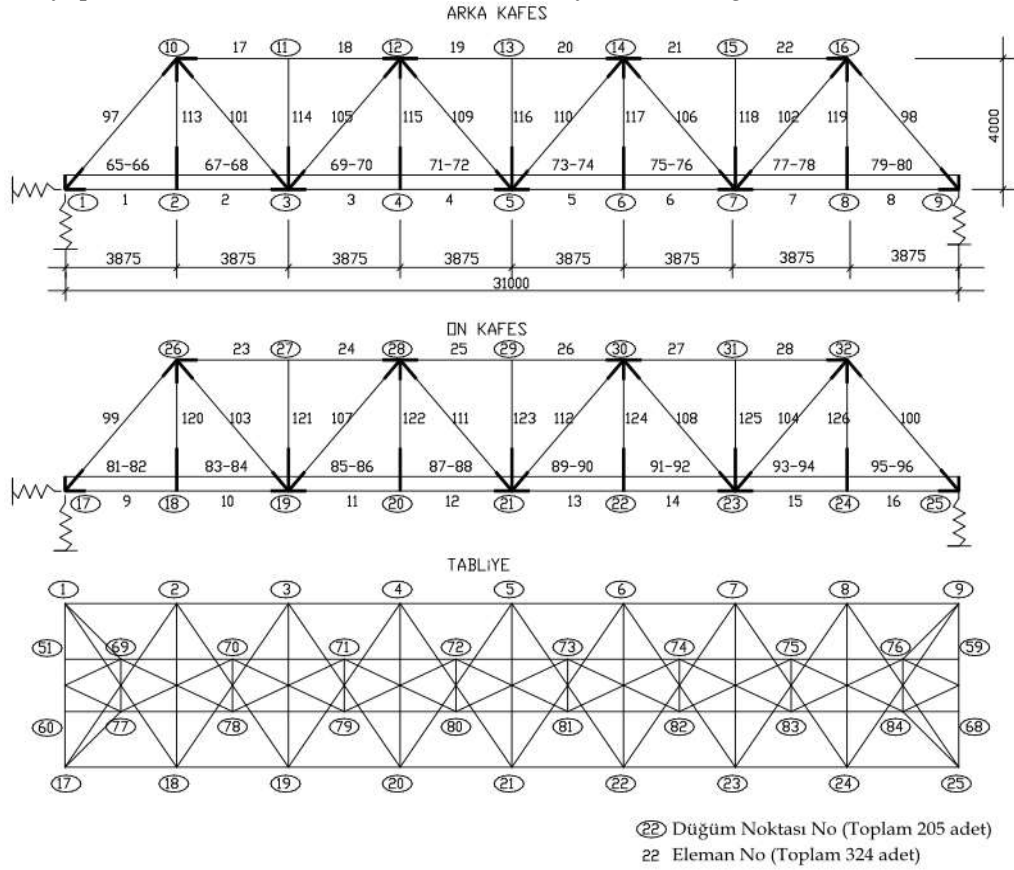
DÖNEM	KATAR TİPİ	GÜNLÜK GEÇİŞ	YILLIK GEÇİŞ
1912-1922	Yük	4	1460
	Yolcu	4	1460
	Karışık (Mix)	4	1460
1923-1937	Yük	8	2920
	Yolcu	6	2190
	Karışık (Mix)	6	2190
1938-1949	Yük	10	3650
	Yolcu	6	2190
	Karışık (Mix)	6	2190
1950-1964	Yük	10	3650
	Yolcu	6	2190
	Karışık (Mix)	6	2190
1965-1969	Yük	12	4380
	Yolcu	8	2920
	Karışık (Mix)	6	2190
1970-1976	Yük	16	5840
	Yolcu	14	5110
	Karışık (Mix)	6	2190

### Köprünün Bilgisayar Modeli (Computer Model Of The Bridge)

Projesi "Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit Eisernem Überbau auf den Prinzipischen Staatseisenbahnen vom 1 May 1903" şartnamesine göre yapılan Diliskelesi Demiryolu Köprüsü' nün bilgisayar modeli, orjinal projeleri ve köprüden alınan fotoğraflar esas alınarak hazırlanmıştır.

Tüm yapısal düzensizlikleri ve rijitlik değişikliklerini içeren bu bilgisayar modelinde, altı serbestlik dereceli çubuk elemanlar kullanılmıştır. Düğüm noktalarında kullanılan birleşim levhaları ve enleme-

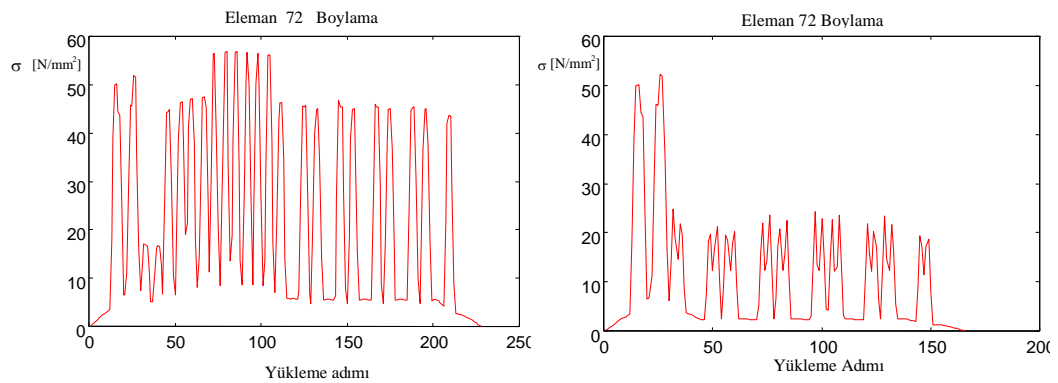
dikme birleşimlerindeki guseler, rijit çubuklarla modellenmiştir (Şekil 8). Mesnet bölgelerinde yaylar tanımlanarak yapının davranışı ile modelin davranışının aynı olması sağlanmıştır.



Şekil 8. Diliskelesi köprü modeli  
Figure 8. Computer model of Diliskelesi Bridge

### Belirlenen Katar Tiplerinin Model Üzerinde Yürütülmesi (Applying the Moving Load of the Selected Train Sequences to the Bridge Model)

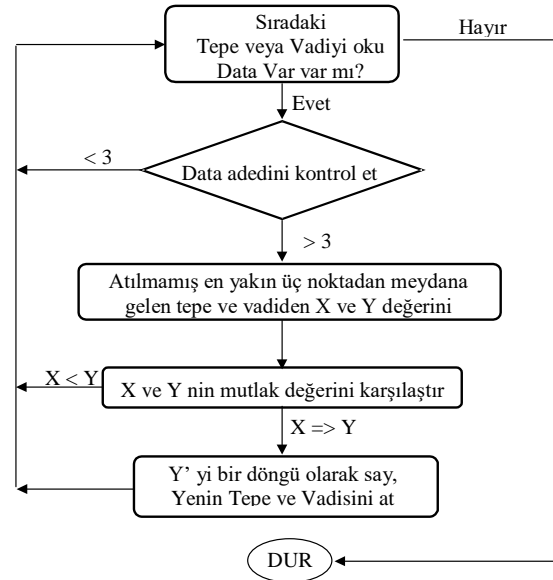
Belirlenen katar tipleri 50 cm adım aralıkları ile bilgisayar ortamında köprü modeli üzerinde yürütülmüş ve her eleman için katarın değişik pozisyonlarına bağlı çubuk uç kuvvetleri ve gerilmeler elde edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Değişik katar tipleri için tipik gerilme – yük adımı grafiği  
Figure 9. Moving load step-stress graph for a load train (rainflow count)

Katarların köprüden geçirilmesiyle elde edilen gerilme tesir çizgilerinin, ASTM (1986) standardında verilen ve Downing ve Socie (1982) tarafından geliştirilen "Rainflow Counting" algoritması kullanılarak gerilme tekrar sayıları (cycle count) Matlab (1992) altında yazılan bir program ile sayılmıştır. Söz konusu algoritma akış diyagramı Şekil 10.a' da verilmiştir:

Tasarımda, %1 veya daha az gerçekleşme olasılığına sahip darbe katsayıları kullanılmaktadır. Böylece, bir demiryolu köprüsünün normal şartlarda tasarım ömrü olan 80 yılda, bu seviyedeki darbe katsayısı, oldukça muhtemel olarak yalnız birkaç kez gerçekleşebilir. BE ve AREMA standartlarına göre hesaplanmış olan darbe katsayıları değerlerinin, arazide köprü üzerinde yapılmış olan statik ve dinamik ölçümlerden elde edilenlerle (bkz Çizelge 2) mukayese edilip büyük değer hesaplarında göz önüne alınmıştır. Gerilme aralıkları ve tekrar sayıları örnek olarak Şekil 10.b, Çizelge 3 ve 4' de verilmiştir.



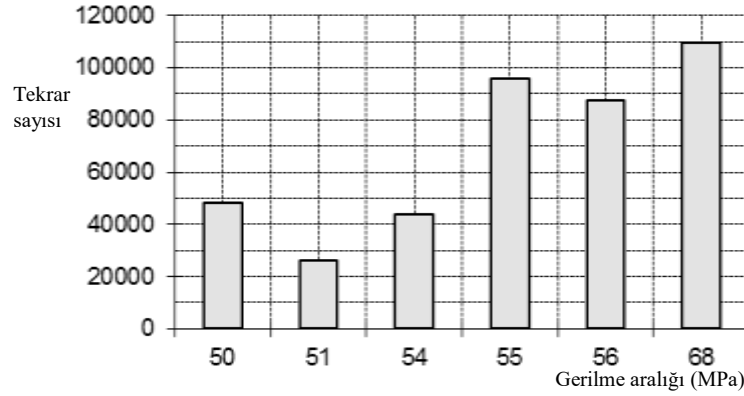
Şekil 10. a) Tekrar sayısı hesaplama akış diyagramı

Figure 10. a) Rainflow counting flow chart

Çizelge 2. 1992-1994 yılları arası test edilmiş makas köprülerden bulunan darbe ( $\varphi$ ) değerlerinin istatistiği.

Table 2. Statistical study for impact factor ( $\varphi$ ) for the truss bridges tested between 1992-1994

Eleman tipi	Ortalama	Maksimum	Standart sapma
Üst başlık	1.0844	1.2167	0.0769
Alt başlık	1.1031	1.2167	0.0639
Diyagonaller	1.0666	1.2362	0.0262
Dikme	1.0911	1.3306	0.0331
Enleme	1.0847	1.2766	0.0307
Boylama	1.051	1.2621	0.0254



Şekil 10. b) Tekrar sayısı-gerilme aralığı histogramı (enleme kirişi için)

Figure 10. b) Rainflow counting (transverse beam)

Çizelge 3. a) Enleme kirişleri için gerilme aralığı tekrar sayısı.

Table 3. a) Rainflow count for transverse beam

GERİLME ARALIĞI (N/mm <sup>2</sup> )	GERİLME ARALIĞI (Darbe Katsayısı $\square=1.32$ ) (N/mm <sup>2</sup> )	TEKRAR SAYISI
40	53	35770
41	54	13330
46	61	48180
50	66	48180
51	67	26280
54	71	43800
55	73	95630
56	74	87600
68	90	109500

Çizelge 3. b) Boylama kirişleri için gerilme aralığı tekrar sayısı.

Table 3. a) Rainflow count for longitudinal beam

GERİLME ARALIĞI (N/mm <sup>2</sup> )	GERİLME ARALIĞI (Darbe Katsayısı $\square=1.32$ ) (N/mm <sup>2</sup> )	TEKRAR SAYISI
37.9	50	418290
38.6	51	172280
39.4	52	497130
40.9	54	197100
41.7	55	118990
42.4	56	57670
43.9	58	191260
45.5	60	40880
47	62	62780
48	63	25120
49	64	48180
51	67	52560
52	68	25550
55	72	43800
57	75	62780
59	77	120450
73	96	109500

### Test Edilen Kirişlerin Hali Hazır Yorulmalarının Tayini ve Artık Yorulma Ömürlerinin Saptanması (Determining The Cumulative Fatigue Damages And Remaining Fatigue Life of the Tested Beams)

Günümüzde "Miner Kuralı" olarak bilinen lineer hasar kuralı, ilk olarak 1924' de Palmgren tarafından sunulmuş, 1945 de Miner tarafından geliştirilmiştir (Denklem, 1 ve 2).

n, S gerilme aralığı seviyesindeki tekrar sayısı ve N de, bu gerilme seviyesindeki yük tekrar sayısı cinsinden yorulma ömrü olmak üzere,

$$\frac{n}{N} = \text{Tekrar oranı} \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Kullanılan ömür olarak hasar miktarı D ise, yukarıdaki oranın toplamı olarak

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir ve 1'den büyük veya eşit durumu, hasar olarak nitelendirilir.

## LABORATUVAR TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME (LABOURATORY TEST RESULTS AND EVALUATION)

### Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Diliskelesi Köprüsü'nden alınan test numuneleri üzerinde çekme ve sertlik deneyleri yapılmış, sonuçlar Çizelge 4' de verilmiştir. Yumuşak çelikte, "wrought-iron" nın çekme mukavemetleri birbirlerinden çok farklı gözükmemekle birlikte akma gerilmesi ve elastisite modüllerinde fark vardır. Diğer bazı araştırmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

**Çizelge 4.** Malzeme test sonuçları.

*Table 4. Material test results*

	Wrought iron			Yumuşak çelik		
	Ort.	sd	ns	Ort.	sd	ns
Akma Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	270	18	5	226	12	8
Çekme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	390	15	5	388	22	8
Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	150000-182000			210000		
Brinell Sertlik	111.8			120		

Ort. : Ortalama, sd : Standart Sapma, ns : Numune Sayısı

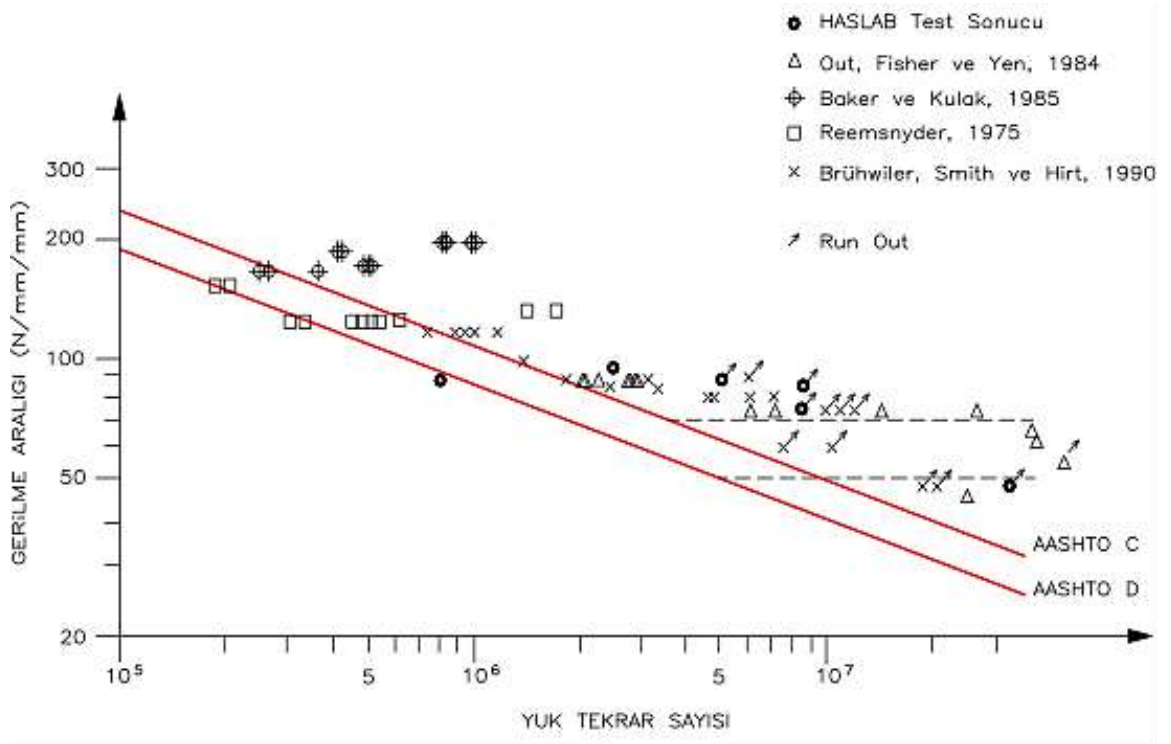
### Yorulma Testi (Fatigue Tests)

Daha önceki bölümlerde verilen esaslar altında yapılan yorulma test sonuçları Çizelge 5 ve Şekil 11' de verilmiştir. Şekil 12' de test düzeneği ve deney sonu oluşan yorulma çatlakları görülmektedir

**Çizelge 5.** Yorulma deneyi sonuçları.

*Table 5. Fatigue test results*

Kiriş No	Gerilme aralığı (N/mm <sup>2</sup> )	Tük tekrar sayısı (x1000)	Çatlak yeri	Notlar
1	49	12142	Run out	Yük arttırıldı
	75	850	Run out	Yük arttırıldı
	84	850	Run out	Yük arttırıldı
	95	1608	Perçin yanı	Ani kırılma
2	89	832	Perçin yanı	Çatlak
3	89	5100	Run out	Yük arttırıldı



Şekil. 11. Test sonuçlarının diğer laboratuvarların sonuçlarıyla karşılaştırılması

Figure 11. Comparison of test results with other laboratories' test results



Şekil. 12. Test düzeneği ve yorulma çatlığı

Figure 12. Test setup and fatigue crack

### TEST SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE YORULMA ÖMRÜ TAYİNİ (EVALUATION OF THE TEST RESULTS AND FATIGUE LIFE PREDICTION)

Çizelge 3a ve 3b' de toplu olarak sunulan gerilme aralığı-tekrar sayısı sonuçlarının değerlendirilmesinde "Miner Lineer Hasar Birikimi" metodundan ve AASHTO S-N diyagramından hareketle (Denklemler, 3);



$$N = M \Delta\sigma_r^{-3} \quad (3)$$

M : AASHTO D ve C kategorileri katsayısı

$\Delta\sigma_r$  : gerilme aralığı

olmak üzere;

D kategorisi eğrisi için  $N = 7.64572 \times 10^{11} \times \Delta\sigma_r^{-3}$

C kategorisi eğrisi için  $N = 1.52914 \times 10^{12} \times \Delta\sigma_r^{-3}$  dir.

Yorulma limiti D kategorisi için 49.2 N/mm<sup>2</sup>, C kategorisi için ise 70.3 N/mm<sup>2</sup> olduğundan, bu gerilmeler altındaki değerler ihmal edilerek, Diliskelesi köprüsünün enleme ve boylama kirişlerine ait yorulma hasar birikimi hesaplanmıştır (Çizelge 6-7).

**Çizelge 6.** Diliskelesi Köprüsü enleme kirişlerinde toplam yorulma hasarı (darbe katsayısı  $\varphi=1.32$ ).

*Table 6. Cumulative fatigue damage for Diliskelesi bridge transverse beams (impact factor  $\varphi=1.32$ ).*

Gerilme N/mm <sup>2</sup> A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N C	Toplam Hasar D=B/C	N E	Toplam Hasar F=B/E
53	35770	5194176	0.0069	-	-
54	13330	4823308	0.0028	-	-
61	48180	3415255	0.0141	-	-
66	48180	2659418	0.0181	-	-
67	26280	2506029	0.0105	-	-
71	43800	2111132	0.0207	4222252	0.0104
73	95630	1998060	0.0479	3996110	0.0239
74	87600	1892921	0.0462	3785832	0.0231
90	109500	1057231	0.1036	2114456	0.0518
			<b>% 27.1</b>	<b>% 10.9</b>	

**Çizelge 7.** Diliskelesi Köprüsü boylama kirişlerinde toplam yorulma hasarı ( $\varphi=1.31$ ).

*Table 7. Cumulative fatigue damage for Diliskelesi bridge longitudinal beams (impact factor  $\varphi=1.31$ ).*

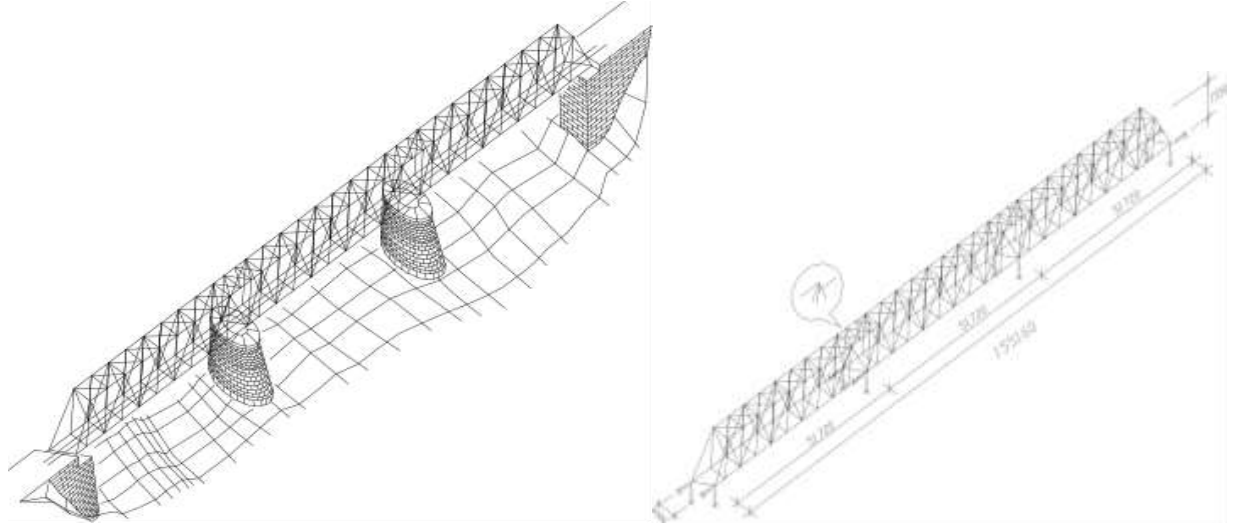
Gerilme N/mm <sup>2</sup> A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N C	Toplam Hasar D=B/C	N E	Toplam Hasar F=B/E
50	418290	6198031	0.0675	-	-
51	172280	5733379	0.0300	-	-
52	497130	5314036	0.0936	-	-
54	197100	4934611	0.0399	-	-
55	118990	4590464	0.0259	-	-
56	57670	4277590	0.0113	-	-
58	191260	3992514	0.0480	-	-
60	40880	3494065	0.0117	-	-
62	62780	3275751	0.0192	-	-
63	25120	3075253	0.0082	-	-
64	48180	2890788	0.0167	-	-
67	52560	2563858	0.0205	-	-
68	25550	2418769	0.0106	-	-
72	43800	2044167	0.0214	4088324	0.0107
75	62780	1836453	0.0342	3672897	0.0171
77	120450	1655955	0.0727	3311901	0.0364
96	109500	874251	0.1253	1748497	0.0626
			<b>% 65.9</b>	<b>% 12.7</b>	

## SEÇİLMİŞ DİĞER KÖPRÜLER İÇİN YORULMA KONTROLÜ (FATIGUE CHECKS FOR THE SELECTED BRIDGES)

Diliskelesi Demiryolu Köprüsünden çıkarılan boylama kirişlerinin testinden şu ana kadar elde edilen verilerin hepsi AASHTO C kategorisi yorulma limitinin üzerindedir. Ancak henüz yeterli test yapılmadığı için hangi kategoriye girdiğini belirtmek zordur. Bunun için seçilen köprülerin yorulma bakımından değerlendirilmesi aşamasında her iki kategoriye yani AASHTO D (ECCS 71) ve AASHTO C (ECCS 90) kategorilerine göre kontroller yapılmıştır.

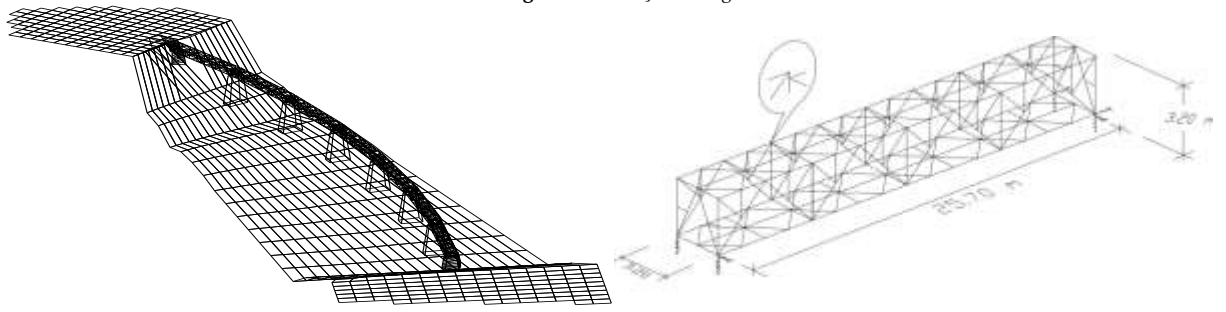
### Köprülerin Bilgisayar Modelleri (Computer Models of the Bridges)

İlk bilgisayar modelleri, orijinal pafta ve hesap ciltlerine göre üç boyutlu olarak üretilen köprülerin nihai modelleri, arazi testlerinden toplanan verilerin ışığı altında, gerçek davranışlarına uygun olarak güncellenmiştir (Uzgider, 1996). Modeller, tüm yapısal düzensizlik ve süreksizlikleri dikkate alınarak yapılmıştır.



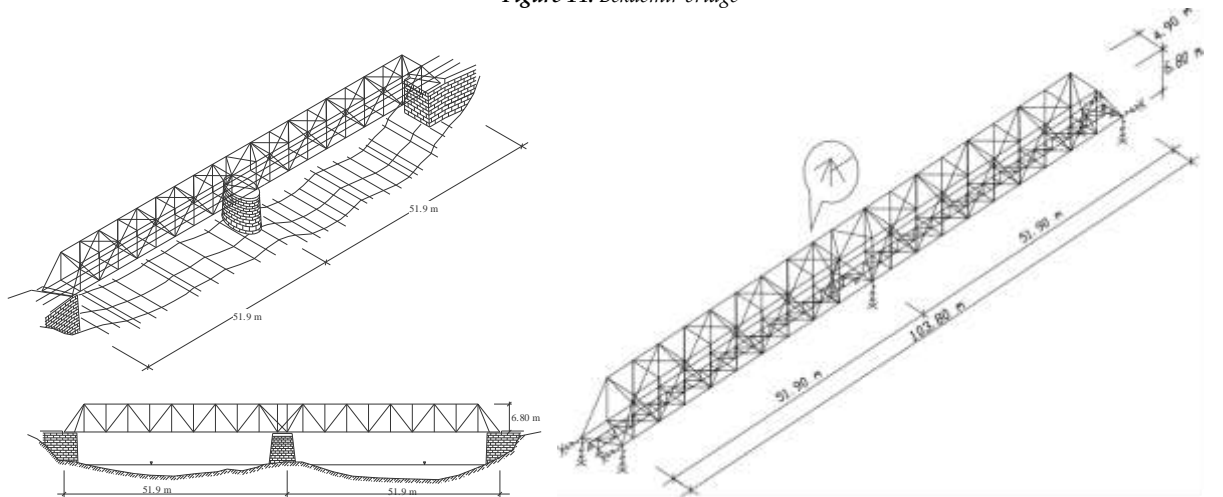
Şekil. 13. Karaçam köprüsü (ölçüler mm)

Figure 13. Karaçam Bridge



Şekil. 14. Bekdemir köprüsü (ölçüler m)

Figure 14. Bekdemir bridge



Şekil. 15. Cambazkaya köprüsü (ölçüler m)

Figure 15. Cambazkaya Bridge

## YORULMA ÖMRÜ TAYİNİ (FATIGUE LIFE EVALUATION)

Herbir köprü modeli üzerinde daha önceden seçilmiş yük katarları 50cm adımlarla yürütülerek her bir eleman için uç kuvvet ve gerilme değerleri katarın farklı pozisyonları için elde edilmiştir.

AASHTO D (ECCS 71) ve AASHTO C (ECCS 90) kategorilerine göre toplam yorulma hasarı kontrolleri yapılmış ve en olumsuz sonuçların çıktığı elemanlar seçilerek izleyen tablolarda verilmiştir.

**Çizelge 8.** Karaçam Köprüsü boylama kirişlerinde toplam yorulma hasarı ( $\varphi=1.31$ ).

*Table 8. Cumulative fatigue damage for Karaçam bridge longitudinal beams (impact factor  $\varphi=1.31$ ).*

Gerilme N/mm <sup>2</sup> A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N C	Toplam Hasar D=B/C	N E	Toplam Hasar F=B/E
72	15330	2063869	0.0074	4127728	0.0037
74	25550	1850544	0.0138	3701078	0.0069
92	21900	989273	0.0221	1978541	0.0111
94	51100	908005	0.0563	1816006	0.0281
96	45990	870695	0.0528	1741385	0.0264
97	50370	835401	0.0603	1670797	0.0301
100	70080	770335	0.0910	1540666	0.0455
126	10950	379047	0.0289	758091	0.0144
130	140160	345291	0.4059	690580	0.2030
132	21900	334933	0.0654	669864	0.0327
134	10950	315427	0.0347	630853	0.0174
138	32850	288911	0.1137	577820	0.0569
141	18250	272864	0.0669	545726	0.0334
142	32850	265285	0.1238	530568	0.0619
156	54750	202911	0.2698	405821	0.1349
			<b>% 141.3</b>		
				<b>% 70.6</b>	

**Çizelge 9.** Bekdemir Köprüsü enleme kirişlerinde toplam yorulma hasarı ( $\varphi=1.31$ ).

*Table 9. Cumulative fatigue damage for Bekdemir bridge transverse beams (impact factor  $\varphi=1.31$ ).*

Gerilme N/mm <sup>2</sup> A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N C	Toplam Hasar D=B/C	N E	Toplam Hasar F=B/E
51	95630	5683175	0.0168	-	-
52	117530	5295824	0.0222	-	-
55	54750	4620632	0.0118	-	-
59	25550	3807283	0.0067	-	-
66	15330	2673977	0.0057	-	-
67	25550	2530759	0.0101	-	-
88	73000	1128084	0.0647	2256162	0.0324
92	163520	998056	0.1638	1996108	0.0819
94	35770	922288	0.0388	1844572	0.0194
95	178120	887269	0.2008	1774532	0.1004
100	25550	763655	0.0335	1527306	0.0167
101	21900	736384	0.0297	1472765	0.0149
110	120450	577579	0.2085	1155155	0.1043
118	23360	461343	0.0506	922683	0.0253
120	17520	447364	0.0392	894725	0.0196
121	17520	433944	0.0404	867885	0.0202
			<b>% 94.3</b>		
				<b>% 43.5</b>	

**Çizelge 10.** Cambazkaya Köprüsü Dikme elemanlarında toplam yorulma hasarı ( $\varphi=1.31$ ).*Table 10. Cumulative fatigue damage for Cambazkaya bridge vertical truss members (impact factor  $\varphi=1.31$ ).*

Gerilme N/mm <sup>2</sup> A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N	Toplam Hasar	N	Toplam Hasar
		C	D=B/C	E	F=B/E
74	73000	1850544	0.0394	3701078	0.0197
81	105120	1431772	0.0734	2863537	0.0367
82	25550	1363604	0.0187	2727202	0.0094
93	25550	947478	0.0270	1894952	0.0135
94	52560	908005	0.0579	1816006	0.0289
100	21900	770335	0.0284	1540666	0.0142
101	140160	740325	0.1893	1480647	0.0947
102	79570	711855	0.1118	1423705	0.0559
105	54750	659147	0.0831	1318290	0.0415
106	65700	634737	0.1035	1269470	0.0518
114	21900	510938	0.0429	1021873	0.0214
116	14600	493521	0.0296	987040	0.0148
			<b>%80.5</b>		
				<b>%43.3</b>	

Söz konusu köprülerin artık yorulma ömürlerinin hesabında bugünkü katar yük ve trafiği ile darbe katsayıları esas alınmış ve köprülerin en kritik elemanlarına göre ayrı ayrı yapılmıştır.

İleride katar, yük ve geçiş sayısı ile yol şartlarının değişmesinden dolayı ortaya çıkacak farklı darbe katsayıları, şüphesiz bu tahminleri değiştirecektir.

Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10 irdelendiğinde kategorilere göre harcanmış yorulma ömrü çok büyük değişkenlik göstermektedir. Hatta bir kategoriye göre yorulma ömrünü tamamlamış diğer kategoriye göre hala hizmet verdiği zaman kadar artık ömrü olduğu görülmektedir.

Çizelge 7-10' da bulunan değerler darbe etkisi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Örnek olarak Çizelge 8' deki değerler darbe katsayısı  $\varphi=1$  olarak tekrar hesaplanacak olursa kategori D için değer %60.1, kategori C için ise % 29.1 olarak bulunur. Bu sonuç darbe etkisinin ne kadar büyük önem taşıdığını göstermesi bakımından çok güzel bir örnektir.

Dolayısıyla adı geçen standartlardaki yorulma limit değerlerinin daha belirgin hale getirilmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur.

## SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND FURTHER STUDIES)

NATO Science for Stability programınca destekli TU-Bridges "Rehabilitation of old railway bridges" Araştırma Projesi kapsamında, İTÜ Rektörlüğü ile TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü arasında imzalanmış olan işbirliği protokolü çerçevesinde başlamış bu proje kapsamında dört adet yüksek lisans tezi tamamlanmıştır. Bu tezlerden bir tanesinde aynı hat üzerinde yer alan dört köprü, yorulma hasar birikimleri ve artık yorulma ömürleri açısından incelenmiştir. Yorulma laboratuvarı HASLAB'ın tanıtılması ile ilgili olarak bir çalışma 2005 yılında yayınlanmıştır. Aynı hat üzerinde hizmet vermiş olmaları nedeniyle aynı katar yük ve trafiğine maruz kaldıkları açıktır. Ancak hepsi aynı dönemde hizmete girmedikleri için yorulma ömürlerinin birbirlerinden bir miktar farklı çıkması beklenen bir olgudur.

Ankara İstanbul hattı üzerinde bir güzergahın değiştirilmesi ile bu köprülerden birinin hat dışında kalması bu çalışma için çok büyük bir şans olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu köprüden, Diliskelesi köprüsü, üzerinden sökülen boylama kirişleri üzerinde yorulma deneyleri yapılmıştır. Bununla birlikte, halen Ankara-İstanbul demiryolu hattında hizmet vermekte olan diğer üç köprünün de güncellenmiş bilgisayar modelleri üzerinden bugünkü ve geçmiş katarlar yürütülerek, elemanların gerilme tesir çizgileri çıkarılmış, "Rainflow Counting" yöntemi ile oluşan gerilme aralıklarının sayısı yapılmıştır. Elde edilen sayım değerleri esas alınarak söz konusu üç köprü için toplam yorulma hasar birikimleri hesaplanmıştır. Benzer bir çalışma Marmaray Projesi kapsamında Yedikule köprüsü için oldukça detaylı olarak yapılmıştır.

Ulaşılan sonuçlar ve ileriki çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Test edilen elemanın metalurjik yapısı, bulunduğu yerdeki çevre şartları, işçilik, korozyon testlerden elde edilen sonuçların dağılık olmasına yol açmaktadır. Güvenilir bir istatistiki değerlendirme için test sayısı artırılmalıdır. Hangi kategoriye girdiği daha kesin olarak belirlenmelidir.

- Şu ana kadar elde edilmiş sonuçlar AASHTO kategori D (ECCS71) nin kullanılmasıyla daha az artık yorulma ömrünün elde edildiğini göstermektedir.

- Literatür incelendiğinde, hafif derecede korozyona maruz kalan, yumuşak çelikten (mild steel) perçinli olarak üretilmiş köprü taşıyıcı elemanlarının artık yorulma ömrünü belirlerken, AASHTO kategori D (ECCS 71) değerlerinin kullanılması makul bir yaklaşım sağladığı ifade edilmektedir.

- Sabit genlikli (constant amplitude) yorulma limitinin üzerinde, hafif derecede korozyona maruz kalmış wrought-iron perçinli köprü taşıyıcı elemanları ile, yumuşak çelik (mild steel) perçinli köprü taşıyıcı elemanlarının yorulma mukavemeti aynıdır.

- Büyük numune (full scale) test verisi incelenirse, wrought-iron perçinli köprü taşıyıcı elemanları için Hirt tarafından elde edilen sabit büyüklük yorulma limiti 70 N/mm<sup>2</sup> civarındadır. Öte yandan aynı limit için Out (1984) 45 N/mm<sup>2</sup> bulmuştur. Bu farkın nedeni Hirt tarafından, imalatta kullanılan yöntemlerin farklılığı ve işçilik ile izah edilmektedir. Kuzey Amerika'da delikler zımbalama yöntemiyle açılmakta bu da delik çevresinde artık gerilme oluşturmaktadır. Oysa Avrupa'da delikler matkap ile açılmaktadır.

Sabit genlikli (constant amplitude) yorulma limitinin aynı elde edilmemesinin bir diğer nedeni de malzemenin mikro yapısal farkıdır.

- Şu ana kadar elde edilen test sonuçlarının tamamı AASHTO Kat. C (ECCS 90) nin üzerindedir. Ancak kesin değerlendirilmeye henüz ulaşamadığından Ankara-İstanbul demiryolu hattındaki üç köprüünün değerlendirilmesinde hem Kategori D, hem de Kategori C hesaba katılmıştır. Görüldüğü gibi bu da artık yorulma ömrü sonuçlarını oldukça etkilemektedir

- Ayrıca, verilen sonuçlardan da görüleceği üzere, darbe katsayısı, toplam yorulma hasar birikimini doğrudan ve oldukça önemli miktarda etkilemektedir. Bu da artık yorulma ömrüne tesir etmektedir. Dolayısı ile darbe katsayısının sağlıklı şekilde elde edilmesi bir zorunluluktur.

- Bünyesinde yorulma çatlağı olan elemanların onarımı, gerekiyorsa güçlendirilmesi, arazi şartlarına uygun hızlı ve güvenilir tekniklerin geliştirilmesine yönelik büyük numune deneyleri gerçekleştirilmelidir.

#### KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmanın yapılmasında gerekli ekipmanların sağlanmasını temin eden NATO Science for Stability araştırma programına, TCDD Genel Müdürlüğü'ne, İTÜ Rektörlüğü'ne ve İTÜ İnşaat Fakültesi Dekanlığı'na, Haslab yorulma laboratuvarının kurulmasında çok büyük emeği geçen ve bu testlerin başlatılmasına öncü olan ve bize yol gösteren hocamız emekli Prof. Dr. Erdoğan Uzgider'e ve proje sırasında baş araştırmacılardan biri olan Ahmet Kutlu Şanlı' ya da teşekkürlerimizi sunarız.

Haydarpaşa'da bulunan yorulma laboratuvarımız TCDD ile imzalanan bir protokol çerçevesinde bu sene sonuna kadar İTÜ inşaat fakültesinde bulunan deprem laboratuvarına taşınacaktır. Bundan sonraki yorulma testlerine İstanbul Maslak da bulunan İTÜ kampüsünde devam ettirilecektir.

Bu çalışmaların sonucunda bir adet yüksek lisans tezi tamamlanmıştır (Kaya, 1997).

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Highway Bridges, 1989- 2014 14th-17th Edition, Washington D.C.

American Society for Testing and Materials, 1986, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol.03.01, Philadelphia

- AREA, American Railway Engineering Association, Specifications for Steel Railway Bridges, 1991, Manual for Railway Engineering, Chapter 15, Washington D.C.
- AREMA Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği, 1997
- Baker, K.A., Kulak, G.L., 1985, "Fatigue of Riveted Connections", Canadian J. Civil Engineering, Vol. 12
- Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., 1987, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice Hall Inc., Englewood cliffs, New Jersey
- BE Çelik Demiryol Köprüleri İçin Hesap Esasları 1960
- Brühwiler, E., Smith, I.F.C. and Hirt, M.A., 1988, "Fatigue and Fracture of Riveted Bridge Members", Journal of Structural Engineering, Vol. 116 No 1,
- COSMOS/M(386) Version 1.65, 1991, Finite Element System Software, Structural Research and Analysis Co., Santa Monica California USA
- Downing, S.D., Socie, D.F., 1982, "Simplified Rainflow Counting Algorithms", Int. J. Fatigue, Vol.4, No. 1, pp. 31-40.
- Fisher, J.W., Yen, B.T., Wang, D. 1989, "Fatigue of Bridge Structures", A Commentary and Guide for Design, Evaluation and Investigation of Cracking, ATLSS Report No. 89-02
- Fisher, J.W., Yen, B.T. and Wang, D. 1987, "Fatigue and Fracture Evaluation for Rating Riveted Bridges", National Cooperative Highway Research Program Report 302
- Kaya, H. 1997, Mevcut Çelik Demiryolu Köprülerinde Yorulma Ömrü Tayini, Yüksek Lisans tezi, ITU.
- Matlab Matrix Laboratory, 1992, High Performance Numeric Computation and Visualization Software, The Math Works Inc. Mass. USA
- Miner, M.A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue", J. Appl. Mech., Vol.12, Trans. ASME, Vol.67, pp.A159-A164,
- Out, J.M.M., Fisher, J.M., Yen, B.T., 1984, "Fatigue Strength of Weathered and Deteriorated Riveted Members", Fritz Engineering Laboratory Report 483-3C84
- Palmgren, A. 1924, "Durability of Ball Bearings", ZVDI, Vol.68, No.14, pp.339-341 (in German)
- Reemsnyder, H.S., 1975, "Fatigue Life Extension of Riveted Connections", ASCE J. Struct.Div. No.101, pp.2591.
- TCDD Genel Müdürlüğü İstatistik Yıllığı
- TCDD Genel Müdürlüğü, Tren Sefer ve Katar Bilgileri
- Uzgider, E., Şanlı, A.K., Piroğlu, F., Çağlayan, B.O., 1996, "General Report for the Bridge Tests Conducted in 1992, 1993 and 1994", TU-BRIDGES Research Project Report No 4.
- Uzgider, E., Gündüz, N., Aydoğan, M., Piroğlu, F., Çağlayan, B.O., Rahmatian, P., Ilıcalı, B., 1996, "Testing & Evaluation of Cambazkaya Railway Bridge", TU-BRIDGES Research Project Report No 6
- Uzgider, E., Şanlı, A.K., Piroğlu, F., Özgen, A., Çağlayan, B.O., Tektunalı, A.C., 1996, "Testing & Evaluation of Karacam Railway Bridge", TU-BRIDGES Research Project Report No 5
- Uzgider, E.A., Çağlayan, B. O., Kaya H., 2005, "Gerçek Boyutlu Çelik Köprü Elemanlarının Yorulma Testi ve Artık Yorulma Ömrü Tespiti", Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 436 2005/2
- Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit Eisernem Überbau auf den Prinzipischen Staatseisenbahnen vom 1 May 1903





## POLAR REPRESENTATION OF COMPLEX OCTONIONS

<sup>1</sup>Mehdi JAFARI

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Technical and Vocational University, Urmia, IRAN

<sup>1</sup>mj\_msc@yahoo.com

(Geliş/Received: 26.03.2016 ; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.04.2016 )

**ABSTRACT:** The complex octonions are a non-associative extension of complex quaternions, are used in areas such as quantum physics, classical electrodynamics, the representations of robotic systems, kinematics *etc.* (Kansu *et al.*, 2012, James *et al.*, 1978). In this paper, we study the complex octonions and their basic properties. We generalize in a natural way De-Moivre's and Euler's formulae for division complex octonions algebra.

**Key Words:** De-Moivre's formula, Euler's formula, Complex octonion

### Kompleks Oktonioların Kutupsal Gösterimi

**ÖZ:** Kompleks oktonyonlar, kompleks kuaterniyonların birleşimli olmayan ve kuantum fiziği, klasik elektrodinamik, robotik sistemlerin gösterimleri, kinematik (Kansu *et al.*, 2012, James *et al.*, 1978) gibi alanlarda kullanılan bir uzantısıdır. Bu makalede, kompleks oktonyonlar ve temel özelliklerini çalıştık. De-Moivre ve Euler formüllerini Kompleks oktonyonlar cebiri için tabii bir şekilde genelleştirdik.

**Anahtar Kelimeler:** De Moivre's formülü, Euler's formülü, Kompleks oktonyonlar.

### INTRODUCTION

The octonions are the largest of the four normed division algebras. While somewhat neglected due to their non-associativity, they stand at the crossroads of many interesting fields of mathematics (Baez, 2002). A study of the classical electromagnetism's energy described by the complex octonions in sixteen dimensions is given by Kansu *et al.* (Kansu *et al.*, 2012). The complex exponential  $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$  generalizes to quaternions by replacing  $i$  by any unit quaternion  $\mu$  since any unit pure quaternion is a root of  $-1$ . Hence, any quaternion may be represented in the polar form  $q = |q| e^{\mu\theta}$  where  $\theta$  is a real angle. As with complex numbers and quaternions, any octonion can be written in polar form as  $x = r(\cos \varphi + \vec{w} \sin \varphi)$  where  $r = \sqrt{N_x}$  and  $\vec{w}^2 = -1$ . In this paper, we introduce the complex octonions algebra,  $O_c$ , and study some fundamental algebraic properties of them. The polar representation of complex octonions are given, and then by means of the De-Moivre's theorem, any powers of these octonions are obtained. Finally, we give some examples for more clarification.

**MATERIAL AND METHOD**

A complex octonion  $X$  has an expression of the form

$$X = A_0 e_0 + A_1 e_1 + A_2 e_2 + A_3 e_3 + A_4 e_4 + A_5 e_5 + A_6 e_6 + A_7 e_7 = A_0 e_0 + \sum_{i=1}^7 A_i e_i, \tag{1}$$

where  $A_0 - A_7$  are complex numbers and  $e_i, (0 \leq i \leq 7)$  are octonionic units satisfying the equalities that are given in the table below;

**Table 1.** Octonionic units

.	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$
$e_1$	-1	$e_3$	-	$e_5$	-	-	$e_6$
			$e_2$		$e_4$	$e_7$	
$e_2$	-	-1	$e_1$	$e_6$	$e_7$	-	-
	$e_3$					$e_4$	$e_5$
$e_3$	$e_2$	$-e_1$	-1	$e_7$	-	$e_5$	-
					$e_6$		$e_4$
$e_4$	-	-	-	-1	$e_1$	$e_2$	$e_3$
	$e_5$	$e_6$	$e_7$				
$e_5$	$e_4$	$-e_7$	$e_6$	$-e_1$	-1	$-e_3$	$e_2$
$e_6$	$e_7$	$e_4$	$-e_5$	$-e_2$	$e_3$	-1	$-e_1$
$e_7$	$-e_6$	$e_5$	$e_4$	$-e_3$	$-e_2$	$e_1$	-1

As a consequence of this definition, a complex octonion  $X$  can be written as

$$X = x + i x', \tag{2}$$

where  $x$  and  $x'$ , real and pure octonion components, respectively. The set of all complex octonions is denoted by Oc.

For defined octonion in equation (1), the scalar and vectorial parts can be given, respectively, as

$$S_X = A_0 e_0, \tag{3}$$

$$\vec{V}_X = A_1 e_1 + A_2 e_2 + A_3 e_3 + A_4 e_4 + A_5 e_5 + A_6 e_6 + A_7 e_7. \tag{4}$$

A complex octonion  $X$  can also be written as

$$X = (A_0 e_0 + A_1 e_1 + A_2 e_2 + A_3 e_3) + (A_4 + A_5 e_1 + A_6 e_2 + A_7 e_3)e_4 = Q + Q'e, \tag{5}$$

where  $e^2 = -1$  and

$$Q, Q' \in H_C = \{Q = A_0 + A_1 e_1 + A_2 e_2 + A_3 e_3 \mid e_1^2 = e_2^2 = e_3^2 = -1, A_i \in C\}, \tag{6}$$

the complex quaternion division algebra (Jafari, 2016).

For two complex octonions  $X = \sum_{i=0}^7 A_i e_i$  and  $Y = \sum_{i=0}^7 B_i e_i$ , the summation and subtraction processes are given as

$$X \pm Y = \sum_{i=0}^7 (A_i \pm B_i) e_i. \tag{7}$$

Addition and subtraction of complex octonions is done by adding and subtracting corresponding terms and hence their coefficients, like quaternions.

The product of two complex octonions  $X = S_X + \vec{V}_X$ ,  $Y = S_Y + \vec{V}_Y$  is expressed as

$$XY = S_X S_Y - \langle \vec{V}_X, \vec{V}_Y \rangle + S_X \vec{V}_Y + S_Y \vec{V}_X + \vec{V}_X \times \vec{V}_Y \tag{8}$$

Multiplication is distributive over addition, so the product of two octonions can be calculated by summing the product of all the terms, again like quaternions. This product can be described by a matrix-vector product as

$$X.Y = \begin{bmatrix} A_0 & -A_1 & -A_2 & -A_3 & -A_4 & -A_5 & -A_6 & -A_7 \\ A_1 & A_0 & -A_3 & A_2 & -A_5 & A_4 & A_7 & -A_6 \\ A_2 & A_3 & A_0 & -A_1 & -A_6 & -A_7 & A_4 & A_5 \\ A_3 & -A_2 & A_1 & A_0 & -A_7 & A_6 & -A_5 & A_4 \\ A_4 & A_5 & A_6 & A_7 & A_0 & -A_1 & -A_2 & -A_3 \\ A_5 & -A_4 & A_7 & -A_6 & A_1 & A_0 & A_3 & -A_2 \\ A_6 & -A_7 & -A_4 & A_5 & A_2 & -A_3 & A_0 & A_1 \\ A_7 & A_6 & -A_5 & -A_4 & A_3 & A_2 & -A_1 & A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

where  $X, Y \in O_C$ . Complex octonions multiplication is not associative, since

$$\begin{aligned} e_1(e_2 e_4) &= e_1 e_6 = -e_7, \\ (e_1 e_2) e_4 &= e_3 e_4 = e_7. \end{aligned} \tag{10}$$

It is clear that subalgebra with bases  $e_0, e_1, e_i, e_j$  ( $2 \leq i, j \leq 7$ ) is isomorphic to complex quaternions algebra  $H_C$ .

**SOME PROPERTIES OF COMPLEX OCTONIONS**

1) The Hamilton *conjugate* of  $X = \sum_{i=0}^7 A_i e_i = S_X + \vec{V}_X$  is

$$\bar{X} = A_0 e_0 - \sum_{i=1}^7 A_i e_i = S_X - \vec{V}_X. \tag{11}$$

The complex *conjugate* of  $X$  is

$$X^* = \bar{A}_0 e_0 + \sum_{i=1}^7 \bar{A}_i e_i = (a_0 - ia'_0) e_0 + (a_1 - ia'_1) e_1 + \dots + (a_7 - ia'_7) e_7. \tag{12}$$

The Hermitian *conjugate* of  $X$  is

$$X^\dagger = (\bar{X})^* = \bar{A}_0 e_0 - \sum_{i=1}^7 \bar{A}_i e_i = (a_0 - ia'_0) e_0 - (a_1 - ia'_1) e_1 - \dots - (a_7 - ia'_7) e_7. \tag{13}$$

It is clear the scalar and vector parts of  $X$  is denoted by  $s_x = \frac{X + \bar{X}}{2}$  and  $\vec{v}_x = \frac{X - \bar{X}}{2}$ .

2) The *norm* of  $X$  is

$$N_x = X\bar{X} = \bar{X}X = \|X\|^2 = \sum_{i=0}^7 A_i^2 \in \mathbb{C} \quad (14)$$

If  $N_x = 1$ , then  $X$  is called a unit complex octonion. We will use  $O_C^1$  to denote the set of unit complex octonions. If  $N_x = 0$ , then  $X$  is called a null complex octonion.

**Lemma 1.** Let  $X, Y \in O_C$ . The conjugate and norm of complex octonions satisfy the following properties:

- 1)  $\bar{\bar{X}} = X, (X^*)^* = X, (X^\dagger)^\dagger = X$
- 2)  $\overline{XY} = \bar{Y}\bar{X}, (XY)^* = Y^*X^*, (XY)^\dagger = Y^\dagger X^\dagger$
- 3)  $\overline{X+Y} = \bar{X} + \bar{Y}, (X+Y)^* = X^* + Y^*, (X+Y)^\dagger = X^\dagger + Y^\dagger$
- 4)  $N_x = N_{\bar{x}}, N_{xy} = N_x N_y$

3) The *inverse* of  $X$  with  $N_x \neq 0$ , is

$$X^{-1} = \frac{1}{N_x} \bar{X}. \quad (16)$$

**Example 1.** Consider the complex octonions

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{\sqrt{3}}{2} + 2e_1 + (1-i)e_2 + 2ie_3 + (1+i)e_4 + ie_5 + \frac{1}{2}e_6 - e_7, \\ X_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}e_1 + (1-i)e_2 + 2ie_3 + (1+i)e_4 + \sqrt{2}ie_5 + e_6 + 2e_7, \\ X_3 &= 1 + (2-i)e_1 + ie_2 + e_3 + (1+i)e_4 + ie_5 + e_6 - e_7, \end{aligned} \quad (17)$$

The norms of  $X_1, X_2, X_3$  are

$$N_{X_1} = 1, N_{X_2} = 0, N_{X_3} = 5 - 2i. \quad (18)$$

The conjugates of  $X_1, X_2, X_3$  are

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \frac{\sqrt{3}}{2} - 2e_1 - (1-i)e_2 - 2ie_3 - (1+i)e_4 - ie_5 - \frac{1}{2}e_6 + e_7, \\ X_2^* &= \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}e_1 + (1+i)e_2 - 2ie_3 + (1-i)e_4 - \sqrt{2}ie_5 + e_6 + 2e_7, \\ X_3^\dagger &= 1 - (2+i)e_1 + ie_2 + e_3 - (1-i)e_4 + ie_5 + e_6 - e_7, \end{aligned} \quad (19)$$

The inverse of  $X_1, X_3$  are

$$\begin{aligned} X_1^{-1} &= \frac{\sqrt{3}}{2} - 2e_1 - (1-i)e_2 - 2ie_3 - (1+i)e_4 - ie_5 - \frac{1}{2}e_6 + e_7, \\ X_3 &= \frac{1}{5-2i} [1 - (2-i)e_1 - ie_2 - e_3 - (1+i)e_4 - ie_5 - e_6 + e_7], \end{aligned} \quad (20)$$

and  $X_2$  not invertible.

**Theorem 1.** The set  $O_C^1$  of unit complex octonions is a subgroup of the group  $O_C^0$  where  $O_C^0 = O_C - [0 - \vec{0}]$ .

*Proof:* Let  $X, Y \in \mathbf{O}_C^1$ . We have  $N_{XY} = 1$ , i.e.  $XY \in \mathbf{O}_C^1$  and thus the first subgroup requirement is satisfied. Also, by the property

$$N_X = N_{\bar{X}} = N_{X^{-1}} = 1, \tag{21}$$

the second subgroup requirement  $X^{-1} \in \mathbf{O}_C^1$ .

## RESULT AND DISCUSSION

### Trigonometric Form and De Moivre's Theorem

Every non-null complex octonion  $X = \sum_{i=0}^7 A_i e_i$  can be written in the trigonometric (polar) form

$$X = R(\cos \phi + \vec{W} \sin \phi), \tag{22}$$

with

$$R = \sqrt{|N_X|} = \sqrt{\left| \sum_{i=0}^7 A_i^2 \right|}, \cos \phi = \frac{A_0}{\sqrt{|N_X|}} \text{ and } \sin \phi = \frac{\left( \sum_{i=1}^7 A_i^2 \right)^{1/2}}{\sqrt{|N_X|}}. \text{ The unit complex vector } \vec{W} = \vec{w} + i \vec{w}^* \text{ is}$$

given by

$$\vec{W} = (w_1, w_2, \dots, w_7) = \frac{1}{\left( \sum_{i=1}^7 A_i^2 \right)^{1/2}} (A_1, A_2, \dots, A_7). \tag{23}$$

**Example 2.** The polar form of the complex octonions  $X_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} + (i, 1+i, 2i, 1-i, 2, 0, \sqrt{\frac{3}{2}})$  is

$$X_1 = \cos \frac{\pi}{4} + \vec{W}_1 \sin \frac{\pi}{4} \tag{24}$$

and  $X_2 = i + (1+2i, -i+1, 2-i, -1, 2i, i+1, \sqrt{5})$  is

$$X_2 = \cos \phi + \vec{W}_2 \sin \phi, \phi = \cos^{-1} i = \frac{\pi}{2} - i \ln(-1 + \sqrt{2}), \tag{25}$$

where

$$\vec{W}_1 = \sqrt{2} (i, 1+i, 2i, 1-i, 2, 0, \sqrt{\frac{3}{2}}) \text{ and } \vec{W}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (1+2i, -i+1, 2-i, -1, 2i, i+1, \sqrt{5}). \tag{26}$$

It is clear that  $N_{\vec{W}_1} = N_{\vec{W}_2} = 1$  and  $\vec{W}_1 \vec{W}_1 = \vec{W}_2 \vec{W}_2 = -1$ .

Since  $\vec{W}^2 = -1$  we have a natural generalization of Euler's formula for generalized quaternions

$$\begin{aligned} e^{\vec{W}\theta} &= 1 + \vec{W}\theta - \frac{\theta^2}{2!} - \vec{W} \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^4}{4!} - \dots \\ &= 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \dots + \vec{W} \left( \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \dots \right) \\ &= \cos \theta + \vec{W} \sin \theta, \end{aligned} \tag{27}$$

for any dual number  $\theta$ .

**Lemma 2.** For every unit vector  $\vec{W}$ , we have

$$(\cos \theta_1 + \vec{W} \sin \theta_1)(\cos \theta_2 + \vec{W} \sin \theta_2) = \cos(\theta_1 + \theta_2) + \vec{W} \sin(\theta_1 + \theta_2). \quad (28)$$

**Theorem 2.** (De-Moivre's formula) Let  $X = \sqrt{N_x}(\cos \phi + \vec{W} \sin \phi)$  be a complex octonions. Then for any integer  $n$ ;

$$X^n = (\sqrt{N_x})^n (\cos n\phi + \vec{W} \sin n\phi) \quad (29)$$

**Proof:** The proof will be by induction on nonnegative integers  $n$  and let  $N_x = 1$ .

For  $n = 2$  and on using the validity of theorem as lemma 1, one can show

$$(\cos \phi + \vec{W} \sin \phi)^2 = \cos 2\phi + \vec{W} \sin 2\phi \quad (30)$$

Suppose that  $(\cos \phi + \vec{W} \sin \phi)^n = \cos n\phi + \vec{W} \sin n\phi$ , we aim to show

$$(\cos \phi + \vec{W} \sin \phi)^{n+1} = \cos(n+1)\phi + \vec{W} \sin(n+1)\phi. \quad (31)$$

Thus

$$\begin{aligned} (\cos \phi + \vec{W} \sin \phi)^{n+1} &= (\cos \phi + \vec{W} \sin \phi)^n (\cos \phi + \vec{W} \sin \phi) \\ &= (\cos n\phi + \vec{W} \sin n\phi)(\cos \phi + \vec{W} \sin \phi) \\ &= \cos(n\phi + \phi) + \vec{W} \sin(n\phi + \phi) \\ &= \cos(n+1)\phi + \vec{W} \sin(n+1)\phi. \end{aligned} \quad (32)$$

The formula holds for all integers  $n$ ;

$$X^{-1} = \cos \phi - \vec{W} \sin \phi, \quad (33)$$

$$\begin{aligned} X^{-n} &= \cos(-n\phi) + \vec{W} \sin(-n\phi) \\ &= \cos n\phi - \vec{W} \sin n\phi. \end{aligned} \quad (34)$$

■

**Example 3.** Let  $X = -\sqrt{3} + (1+i, i, 2i, 1-i, 1, 1, 2)$  be a complex octonion. Every power of this octonion is found with the aid of Theorem 1. For example, 20-th and 83-th powers are

$$\begin{aligned} X^{20} &= 2^{20} \left( \cos 20 \frac{5\pi}{6} + \vec{W} \sin 20 \frac{5\pi}{6} \right) \\ &= 2^{20} \left( -\frac{1}{2} + \vec{W} \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 2^{19} [-1 + \sqrt{3}(1+i, i, 2i, 1-i, 1, 1, 2)], \end{aligned} \quad (35)$$

and

$$\begin{aligned} x^{83} &= 2^{83} \left( \cos 83 \frac{5\pi}{6} + \vec{W} \sin 83 \frac{5\pi}{6} \right) \\ &= -2^{82} (\sqrt{3} + \vec{W}). \end{aligned} \quad (36)$$

We investigate some properties of the complex octonions by separating them in two cases:

- i) Complex octonions with complex angles ( $\phi = \varphi + i\varphi^*$ ); i.e.

$$X = \sqrt{|N_x|} (\cos \phi + \vec{W} \sin \phi), \quad (37)$$

ii) Complex octonions with real angles ( $\phi = \varphi$ ,  $\varphi \neq 0$ ); *i.e.*

$$X = \sqrt{|N_x|} (\cos \varphi + \vec{W} \sin \varphi). \quad (38)$$

**Theorem 3.** De Moivre's formula implies that there are uncountably many unit complex octonion  $X = \cos \varphi + \vec{W} \sin \varphi$  satisfying  $X^n = 1$  for  $n \geq 3$ .

**Proof:** For every unit vector  $\vec{W}$ , the unit complex octonion

$$X = \cos \frac{2\pi}{n} + \vec{W} \sin \frac{2\pi}{n}, \quad (39)$$

is of order  $n$ . For  $n = 1$  or  $n = 2$ , the complex octonion  $X$  is independent of  $\vec{W}$ . ■

**Example 4.**  $X = \frac{1}{\sqrt{2}} + (i, 1+i, 2i, 1-i, 2, 0, \sqrt{\frac{3}{2}})$  is of order 8 and  $X = \frac{\sqrt{3}}{2} + (1+i, i, 2i, 1-i, -1, \frac{1}{2}, 2)$  is of order 12.

**Theorem 4.** Let  $X = \cos \varphi + \vec{W} \sin \varphi$  be a unit complex octonion. The equation  $A^n = X$  has  $n$  roots, and they are

$$A_k = \cos\left(\frac{\varphi + 2k\pi}{n}\right) + \vec{W} \sin\left(\frac{\varphi + 2k\pi}{n}\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (40)$$

**Proof:** We assume that  $A = \cos \vartheta + \vec{W} \sin \vartheta$  is a root of the equation  $A^n = X$ , since the vector parts of  $X$  and  $A$  are the same. From Theorem 2, we have

$$A^n = \cos n\vartheta + \vec{W} \sin n\vartheta, \quad (41)$$

thus, we find

$$\cos n\vartheta = \cos \varphi, \quad \sin n\vartheta = \sin \varphi,$$

So, the  $n$  roots of  $X$  are

$$A_k = \cos\left(\frac{\varphi + 2k\pi}{n}\right) + \vec{W} \sin\left(\frac{\varphi + 2k\pi}{n}\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (42)$$

■

**Example 5.** Let  $X = \frac{\sqrt{3}}{2} + (1+2i, -\sqrt{3}, 2i, i-1, \frac{1}{2}, i-1, 2) = \cos \frac{\pi}{6} + \vec{W} \sin \frac{\pi}{6}$  be a unit complex octonion.

The cube roots of the octonion  $X$  are

$$X_k^{1/3} = \cos\left(\frac{\pi/6 + 2k\pi}{3}\right) + \vec{w} \sin\left(\frac{\pi/6 + 2k\pi}{3}\right), \quad k = 0, 1, 2. \quad (43)$$



For  $k=0$ , the first root is  $X_0^{1/3} = \cos \frac{\pi}{18} + \vec{W} \sin \frac{\pi}{18} = 0.98 + 0.17\vec{W}$ , and the second one for  $k=1$  is

$X_1^{1/3} = \cos \frac{13\pi}{18} + \vec{W} \sin \frac{13\pi}{18} = -0.64 + 0.76 \vec{W}$  and third one is

$$X_2^{1/3} = \cos \frac{25\pi}{18} + \vec{W} \sin \frac{25\pi}{18} = -0.34 - 0.93\vec{W}. \tag{44}$$

Also, it is easy to see that  $X_0^{1/3} + X_1^{1/3} + X_2^{1/3} = 0$ .

The relation between the powers of complex octonions can be found in the following Theorem.

**Theorem 5.** Let  $X$  be a unit complex octonion with the polar form  $X = \cos \varphi + \vec{W} \sin \varphi$ .

$$\text{If } m = \frac{2\pi}{\varphi} \in \mathbb{Z}^+ - \{1\}, \text{ then } X^n = X^m \text{ if and only if } n \equiv m \pmod{p}. \tag{45}$$

*Proof:* Let  $n \equiv m \pmod{p}$ . Then we have  $n = a.p + m$ , where  $a \in \mathbb{Z}$ .

$$\begin{aligned} X^n &= \cos n\varphi + \vec{W} \sin n\varphi \\ &= \cos(ap + m)\varphi + \vec{W} \sin(ap + m)\varphi \\ &= \cos\left(a \frac{2\pi}{\varphi} + m\right)\varphi + \vec{W} \sin\left(a \frac{2\pi}{\varphi} + m\right)\varphi \\ &= \cos(m\varphi + a2\pi) + \vec{W} \sin(m\varphi + a2\pi) \\ &= \cos m\varphi + \vec{W} \sin m\varphi \\ &= X^m. \end{aligned} \tag{46}$$

Now suppose

$$X^n = \cos n\varphi + \vec{W} \sin n\varphi \text{ and } X^m = \cos m\varphi + \vec{W} \sin m\varphi. \tag{47}$$

If  $X^n = X^m$  then we get  $\cos n\varphi = \cos m\varphi$  and  $\sin n\varphi = \sin m\varphi$ , which means

$$n\varphi = m\varphi + 2\pi a, a \in \mathbb{Z}. \tag{48}$$

$$\text{Thus } n = m + \frac{2\pi}{\varphi} a \text{ or } n \equiv m \pmod{p}. \tag{49}$$

■

**Example 6.** Let  $X = \frac{\sqrt{2}}{2} + (1 + 2i, -\sqrt{3}, 2i, i - 1, \frac{1}{\sqrt{2}}, i - 1, 2)$  be a unit complex octonion. From Theorem 5,

$$m = \frac{2\pi}{\pi/4} = 8, \text{ so we have}$$

$$\begin{aligned}
X &= X^9 = X^{17} = \dots \\
X^2 &= X^{10} = X^{18} = \dots \\
X^3 &= X^{11} = X^{19} = \dots \\
X^4 &= X^{12} = X^{20} = \dots = -1 \\
&\vdots \\
X^8 &= X^{16} = X^{24} = \dots = 1.
\end{aligned} \tag{50}$$

## CONCLUSION

In this paper, we defined and gave some of algebraic properties of complex octonions and investigated the De Moivre's formulas for these octonions. The relation between the powers of complex octonions is given in Theorem 5. We also showed that the equation  $X^n = 1$  has uncountably many solutions for any unit complex octonions (Theorem 3).

## FUTHER WORK

We will give a complete investigation to real matrix representations of complex octonions, and give any powers of these matrices.

## REFERENCES

- Baez, J., 2002, "The Octonions", Bulletin (New Series) Of The American Mathematical Society (Bull. Amer. Math. Soc.) Vol. 39, pp. 145-205.
- Kansu, M.E., Tanışlı M., Süleyman D., 2012, "Electromagnetic Energy Conservation with Complex Octonions", Turk Journal of Physics, Vol. 36, pp. 438 – 445.
- James, D., Edmonds, J., 1978, "Nine-vectors, Complex Octonion/quaternion Hypercomplex Numbers, Lie groups, and The 'Real' World", Foundations of Physics, Vol. 8, pp. 303-311.
- Jafari, M., 2016, "On The Matrix Algebra of Complex Quaternions", Accepted for publication in TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics. DOI: 10.13140/RG.2.1.3565.2321