

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina

YOL KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN TAŞINAN ÜRÜN ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
CANLANDIRILMASI İÇİN BİR TEST EKİPMANI KONSEPTİNİN GELİŞTİRİLMESİ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN TURBO DİZEL BİR HAVACILIK
MOTORUNUN ENERJİ, EKSERJİ VE EKSERJİ EKONOMİK PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ

METAL VE ALAŞIMLARDA TOPLAM KARBON (C) VE TOPLAM KÜKÜRT (S) TAYİNİ,
METOT VALIDASYONU VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

A SURVEY ON POST-WELD MODIFICATION OF MICROSTRUCTURAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF GTAWED ALUMINUM BUTT JOINTS THROUGH
FSP AND T6 HEAT TREATMENT

WELDING ORDER AND WELDING PENETRATION LEVELS' IMPACT ON PRODUCT
LIFE CYCLE FOR GMAW

ELASTO-PLASTIC DEFORMATION OF A LIQUID AMMONIA STORAGE TANK



tmmob makina mühendisleri odası
uctea chamber of mechanical engineers

www.mmo.org.tr/muhendismakina

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 63

Volume 63

Sayı 708

Number 708

Temmuz-Eylül 2022

July-September 2022

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Yerel Süreli Yayın, Üç Ayda Bir Yayımlanır
Local Periodical - Quarterly

Temmuz-Eylül / July-September 2022

Cilt / Vol: 63 Sayı / No: 708

Yönetim Yeri / Head Office

Meşrutiyet Cad. No: 19/6 Kızılay - ANKARA
Tel: (+90 312) 425 21 41 Fax: (+90 312) 417 86 21
E-posta: yayin@mmo.org.tr www.mmo.org.tr

MMO Adına Sahibi

Publisher
Yunus YENER

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Executive Editor
Yunus YENER

Yayın Sekreteri

Editorial Secretary
Ceren YILMAZ ARAS

Editör / Editorial in Chief

Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Editör Yardımcıları / Associate Editors

Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Eskişehir Osmangazi University*
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi / Çankaya University*

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK - *İstanbul Teknik Üniversitesi / Istanbul Technical University, İstanbul*
Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ - *Kocaeli Üniversitesi / Kocaeli University, İzmit*
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR - *Ege Üniversitesi / Ege University, İzmir*
Prof. Dr. Hikmet RENDE - *Akdeniz Üniversitesi / Akdeniz University, Antalya*
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI - *Yıldız Teknik Üniversitesi / Yıldız Technical University, Antalya*
Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ - *Gaziantep Üniversitesi / Gaziantep University, Gaziantep*
Prof. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*
Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Prof. Dr. Mirosław BONEK - *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU - *Karadeniz Teknik Üniversitesi / Karadeniz Technical University, Trabzon*
Prof. Dr. Leszek A. DOBRZANSKI - *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Ö. Altan DOMBAYCI - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Halim GÜRGENCI - *Queensland Üniversitesi / The University of Queensland, Australia*
Prof. Dr. Hyung-MAN KIM - *Power System and Sustainable Energy Laboratory (PSSSEL), South Korea*
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR - *Linnaeus University, Sweden*
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM - *İzmir Ekonomi Üniversitesi / Izmir University of Economics, İzmir*
Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN - *ESOGÜ / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
Doç. Dr. Tunç APATAY - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU - *TED Üniversitesi / TED University, Ankara*
Dr. Öğr. Üye. Nurdan BİLGİN - *Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Ondokuz Mayıs University, Samsun*
Dr. Öğr. Üye. Kutluk Bilge ARIKAN - *TED Üniversitesi / TED University, Ankara*
Dr. Varlık ÖZERCİYES - *AIRBUS, UK*

Yayın Kurulu / Editorial Board

- Prof. Dr. Metin AKKÖK - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi / Cankaya University, Ankara*
Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
Prof. Dr. Cemal MERAN - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA - *Trakya Üniversitesi / Trakya University, Edirne*
Dr. Öğr. Üye. Gurbet ÖRÇEN - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*

Kapak ve Sayfa Tasarımı

Cover and Page Design
Muazzez POLAT

Teknik Sorumlu

Technical Manager
Mehmet AYDIN

Baskı

Printed by
Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.
30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi - Ankara
Tel: (+90 312) 394 54 94
Basım Tarihi: 2 Haziran 2022
Baskı Sayısı: 1.000

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 63
Volume 63

Sayı 708
Number 708

Temmuz-Eylül 2022
July-September 2022

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Araştırma/Research

Yol Kaynaklı Titreşimlerin Taşınan Ürün Üzerindeki Etkilerinin Canlandırılması İçin Bir Test Ekipmanı Konseptinin Geliştirilmesi 450
Development of A Test Equipment Concept For Reviewing The Effects of Road Generated Vibrations on the Transported Product
Serdar Murat DEMİREL

Araştırma/Research

İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Turbo Dizel Bir Havacılık Motorunun Enerji, Ekserji ve Ekserjiekonomik Performansının Değerlendirilmesi 460
Energy, Exergy and Exergoeconomic Performance Assessments Of A Turbo Diesel Aviation Engine Used On Unmanned Air Vehicles
Özgür BALLI

Araştırma/Research

Metal ve Alaşımlarda Toplam Karbon (C) ve Toplam Kükürt (S) Tayini, Metot Validasyonu ve Ölçüm Belirsizliği
Determination Of Total Carbon (C) and Total Sulfur (S) In Metals and Alloys, Method Validation and Measurement Uncertainty
Fatih TURAN, Sezai ŞEN, Caner TULGAR, Ziya ÇOBAN

Araştırma/Research

A Survey on Post-Weld Modification of Microstructural and Mechanical Properties of GTAWed Aluminum Butt Joints Through FSP and T6 Heat Treatment 279
Tig Alın Kaynaklı Alüminyum Birleştirmelerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin SKP ve T6 Isıl İşlemi Yoluyla Kaynak Sonrası Modifikasyonu Üzerine Bir Araştırma
Gökçe Mehmet GENÇER, Coşkun YOLCU, Fatih KAHRAMAN

Welding Order and Welding Penetration Levels' Impact on Product Life Cycle For GMAW

Gaz Altı Ark Kaynağı Prosesinde Kaynak Sırası ve Kaynak Penetrasyon Seviyesinin Ürün Ömrüne Etkileri

Ceren BİLGİLİ, Sibel UYGUN, Gizem YILMAZ

Elasto-Plastic Deformation of a Liquid Ammonia Storage Tank

Bir Sıvı Amonyak Depolama Tankının Elasto-Plastik Deformasyonu

Göksel SARAÇOĞLU

TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayın Organı olan Mühendis ve Makina dergisi TMMOB Makina Mühendisleri Odası üyelerine ücretsiz olarak gönderilir. 1957 yılından beri yayımlanan dergimiz, **hakemli** bir dergidir. Dergimizle ilgili detaylı bilgi almak için www.mmo.org.tr genel ağ adresinden yararlanabilirsiniz. Telefon, faks veya e-posta aracılığıyla da bize ulaşabilirsiniz.

Dergimizin yer aldığı veritabanları



SUNUŞ

Değerli Meslektaşlarımız Merhaba,

Mühendis ve Makina dergimizin bu sayısındaki ilk makale Serdar **Murat Demirel**'in "Yol Kaynaklı Titreşimlerin Taşınan Ürün Üzerindeki Etkilerinin Canlandırılması için Bir Test Ekipmanı Konseptinin Geliştirilmesi" başlıklı makalesidir. Endüstride, üretilen ürünlerin uygun şekilde ambalajlanması ve taşınması da en az üretimi kadar önem taşımaktadır. Bu nedenle, karayolu taşımacılığında ürünlerin üzerine en çok etkiyen kuvvet olan titreşim kaynaklı kuvvetlerin ürün üzerindeki etkilerinin bilinmesi ürün ve ambalaj tasarımında önemli rol oynamaktadır. Bu amaçla, sürücü ve yolcu konforu için daha önceden yapılan çalışmaların aksine yol titreşimlerinden kaynaklanan kuvvetlerin ürün üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesini sağlayacak, işletmelerde konumlandırılabilir sabit bir test ekipmanı konsepti geliştirilmesi için bu çalışma yapılmıştır. z-ekseni (yer çekimine paralel) doğrultusundaki titreşimleri oluşturabilmek için tamburlu sistem tercih edilmiştir. Bununla beraber, matematiksel olarak elde edilen fonksiyonların CAE metotları ile doğrulaması yapılmıştır.

İkinci makalemiz, **Özgür Ballı**'nin "İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Turbo Dizel Bir Havacılık Motorunun Enerji, Ekserji ve Ekserjiekonomik Performansının Değerlendirilmesi" adlı çalışmasıdır. Bu çalışmada; enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analiz yöntemleri kullanılarak insansız hava araçları için kullanılan turbodizel bir havacılık motorunun performans doğrulaması yapılmıştır. Motorun enerji verimi %43.158, ekserji verimi ise %40.655 olarak bulunmuştur. Motorun yakıt enerjisi kayıp oranı %56.842 iken yakıt ekserji kayıp oranı %59.345 olarak hesaplanmıştır. Turbodizel motorun çevresel etki faktörü 1.460, ekolojik etki faktörü 2.460, ekolojik objektif fonksiyon değeri -227.173 MJ/h, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü ise 1.685 olarak elde edilmiştir. Turbodizel motorun ekonomik ve eksergo-ekonomik analiz sonuçlarına göre; güç üretimi için toplam maliyet akışı 47.035 \$/h ve üretilen gücün özgül ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan motorun yakıt maliyeti ile üretim maliyeti arasındaki bağıl maliyet artışı %248.655, sistemin eksergo-ekonomik faktörü %16.346 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, turbodizel havacılık motoru ile piston-prop havacılık motorunun performans kriterleri de karşılaştırılmıştır. Turbodizel motorun tüm performans parametrelerinin, piston-prop motorun parametrelerinden çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Üçüncü makalemiz, **Fatih Turan, Sezai Şen, Caner Tulgar ve Ziya Çoban**'in "Metal ve Alaşımlarda Toplam Karbon (C) ve Toplam Kükürt (S) Tayini, Metot Validasyonu ve Ölçüm Belirsizliği" adlı çalışmasıdır. Ülkemiz, demir-çelik endüstrisi başta olmak üzere, metal hammadde ve uç ürünlerinin üretimi açısından dünya piyasasında büyük bir öneme sahiptir. Verimli ve yüksek kaliteye sahip bir üretim sürecinin gerçekleştirilebilmesi için malzemenin, tüm üretim süreci boyunca Karbon (C) ve Kükürt (S) konsantrasyonlarının sürekli izlenmesi gerekmektedir. Söz konusu ürünlerin pazarlanması aşamasında da, malzeme niteliklerinin uygunluk değerlendirme kuruluşları tarafından raporlanması gerekmektedir. Bu aşamada ürünlerin kalite kontrol testlerinde, ölçüm sonuçlarının doğruluğunun artırılması ve güvenilirliğinin sağlanması beklenmektedir. Bu amaçla, uygunluk değerlendirme kuruluşları tarafından gerçekleştirilen testlerde öncelikle uygulanan analiz metodunun doğrulanması ve geçerli kılınması sağlanmalıdır. Ancak bu konuda ilgili uluslararası kılavuzlarda açıklanan prosedürlerin dışında kalan farklı uygulamaların olduğu gözlenmektedir. Bu çalışmada, mevcut en iyi tekniklere örnek olarak, metal ve alaşımlarda toplam karbon (C) ve toplam kükürt (S) analizleri için "TS EN ISO/IEC 17025 Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Gereklilikler" standardında açıklanan prosedürler izlenerek yöntem doğrulama ve belirsizlik tahmini çalışmaları yapılmıştır.

Dördüncü makalemiz, **Gökçe Mehmet Gençer, Coşkun Yolcu ve Fatih Kahraman**'ın "Tig Alın Kaynaklı Alüminyum Birleştirmelerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin SKP ve T6 Isıl İşlemi Yoluyla Kaynak Sonrası Modifikasyonu Üzerine Bir Araştırma" adlı makalesidir. Ergitme kaynağı ile birleştirme endüstrinin her alanında yaygın olarak uygulanan imalat yöntemlerindedir. Özellikle yüksek ısı iletim ve genleşme katsayısına sahip, sıvı halde hidrojen çözünürlüğü yüksek olan ve yüzeyinde rijit oksit tabakası bulunan alüminyum alaşımlarının ergitme kaynağıyla imalatında iri tane oluşumu, mekanik özelliklerde düşüş vb. olumsuzluklar gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle ergitme kaynaklı birleştirmelerin ömürleri ve mukavemetleri açısından kaynak sonrası işlem ile kaynak bölgesinin iç yapı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi çoğu uygulama için önemli rol oynamaktadır. Çalışmamızda, tungsten inert gaz (TIG) kaynağı ile birleştirilen AA6082-T6 plakaların kaynak bölgesi özelliklerine kaynak sonrası işlem olarak uygulanan sürtünme karıştırma prosesi (SKP) ve T6 ısıl işleminin etkileri araştırılmıştır. SKP ve T6 ısıl işleminin mekanik özelliklere ve iç yapıya etkileri çekme testi, mikrosertlik testi ve mikroyapı incelemeleri ile araştırılmıştır. SKP ile kaynak dolgusunun işlem gören bölgedeki (karıştırma bölgesi) dendritik tanelerin parçalanarak ince taneli iç yapının elde edildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, SKP'nin malzemede oluşturduğu ısıl girdi ile ısıdan etkilenen bölgenin (IEB) genişlemesine ve sertliğin daha geniş bölgede düşmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak sonrası uygulanan T6 ısıl işlemi ile kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerin artırıldığı ancak tokluğunun azaldığı gözlemlenmiştir.

Beşinci makalemiz, **Ceren Bilgili, Sibel Uygun ve Gizem Yılmaz**'ın "Gaz Altı Ark Kaynağı Prosesinde Kaynak Sırası ve Kaynak Penetrasyon Seviyesinin Ürün Ömrüne Etkileri" isimli makalesidir. Gaz metal ark kaynağı, gaz altı kaynağının alt türleri olan "metal inert gaz kaynağı" veya "metal aktif gaz kaynağı" olarak da adlandırılan yüksek hızlı, ekonomik bir işlemdir. Bu yöntem birçok endüstride farklı parça üretimleri için kullanılmaktadır. Bu bildiride, ilgili sürecin otomotiv uygulamalarına ve bu üretim yönteminin parametrelerinin bir aracın aks bileşeninin dayanıklılık performansı üzerindeki etkisine odaklanıldı. Dayanım performans seviyesi değişiklikleri; seri hayat imalat koşullarında üretilen ve gerçek hayat yol yükü şartlarında test edilen akslar üzerinde tespit edildi. Teorik hesaplamalar ve fiziksel testlerden sonra, kaynak işleminin her parametresi için ölçülen her iyileştirme belgelendi. Tüm bu veriler detaylı bir şekilde analiz edildi ve bu parametrelerin aks ömrü üzerinde öngörülen etkileri, seri ömür kullanım koşulu beklentilerine göre değerlendirildi.

Altıncı ve son makalemiz **Göksel Saraçoğlu**'nun "Bir Sıvı Amonyak Depolama Tankının Elasto-Plastik Deformasyonu" isimli makalesidir. Bu çalışma, bir kimyasal gübre fabrikasında kullanılan 10.000 ton kapasiteli çift cidarlı sıvı amonyak depolama tankının iç taban sacının elasto-plastik deformasyonunu sunmaktadır. Hammaddenin -33°C'de stoklandığı tankın taban sacında karşılaşılan problemin, tankın bir önceki iç bakım sonrası hızlı soğumaya maruz bırakılmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Taban sacından kesilen numune üzerinde yapılan mekanik testler, plastik deformasyonun %1,94 oranında gerçekleştiğini ancak tokluğun değişiklik gerektirmeyen bir seviyede olduğunu göstermiştir. Bu nedenle ilgili standart API-620'nin belirttiği 1°C/saat ısıtma ve soğutma kuralına uyularak mevcut taban sacının kullanımına devam edilebileceği öngörülmüştür.

Dergimize www.mmo.org.tr/muhendismakina ve <https://dergipark.org.tr> adresinden ulaşabilir; makale ve görüşleriniz ile destek olabilirsiniz.

Bir sonraki sayımızda buluşmak üzere...

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Yönetim Kurulu

PRESENTATION

Dear Colleagues,

*The first article published in our journal Engineer and Machinery is the article titled “Development of A Test Equipment Concept For Reviewing The Effects of Road Generated Vibrations on the Transported Product” by **Serdar Murat Demirel**. In the industry, proper packaging and transportation of the products is at least as important as its production. Therefore, knowing the effects of vibration-induced forces on the product, which is the most effective force on the products in road transport, plays an important role in product and packaging design. For this purpose, this study has been carried out to develop a stationary test equipment concept that can be positioned in enterprises, which will enable the effects of the forces arising from road vibrations to be observed on the product, contrary to previous studies for driver and passenger comfort. In order to generate vibrations in the z-axis (parallel to gravity) direction, a drum system is preferred. In addition, the mathematically obtained functions were verified with CAE methods.*

*The our second article is titled “Energy, Exergy and Exergoeconomic Performance Assessments Of A Turbo Diesel Aviation Engine Used On Unmanned Air Vehicles” by **Özgür Ballı**. In this study, the performance of a turbodiesel aviation engine used in unmanned aerial vehicles was evaluated using energy, exergy, and exergoeconomic analyses methods. The engine’s energy efficiency was 43.158%, while its exergy efficiency was 40.655%. When the engine’s fuel energy loss rate was 56.842%, the fuel exergy loss rate was calculated to be 59.345 %. The environmental impact factor, ecological impact factor, ecological objective function, exergetic sustainability index, and sustainable efficiency factor of a turbodiesel engine were calculated to be 1.460, 2.460, -227.173 MJ/h, 0.685, and 1.685, respectively. According to the results of the turbodiesel engine’s economic and exergo-economic analyses, the total cost flow for power generation was calculated to be 47.035 \$/h, and the specific exergy cost of the generated power was calculated to be 0.095 \$/MJ. The relative cost increasing (relative cost difference) between the engine’s fuel cost and the production cost was found to be 248.655% and the system’s exergoeconomic factor was found to be 16.346%. Furthermore, the performance criteria of the turbodiesel aviation engine and the piston-prop aviation engine were compared in this study. The turbodiesel engine’s performance parameters were determined to be significantly better than those of the piston-prop engine.*

*The our third article is titled “Determination Of Total Carbon (C) and Total Sulfur (S) In Metals and Alloys, Method Validation and Measurement Uncertainty” by **Fatih Turan, Sezai Şen, Caner Tulgar, Ziya Çoban**. Our country has a great importance in the world market in terms of the production of metal raw materials and end products, especially in the iron and steel industry. In order to realize an efficient and high quality production process, it is necessary to continuously monitor the Carbon (C) and Sulfur (S) concentrations of the material throughout the entire production process. During the marketing phase of the products in question, the material qualities must be reported by the conformity assessment bodies. At this stage, it is expected to increase the accuracy and reliability of the measurement results in the quality control tests of the products. For this purpose, the verification and validation of the analysis method which were employed should be carried out by the conformity assessment bodies. However, it is observed that there are different applications that fall outside the procedures described in the relevant international guidelines. In this study as an example to the best available techniques, method validation and uncertainty estimation studies were carried out for the total carbon (C) and total sulfur (S) analyses in metals and alloys following the procedures described in the standard of “General Requirements for the Competence of Test and Calibration Laboratories”.*

The our fourth article is titled “A Survey on Post-Weld Modification of Microstructural and

*Mechanical Properties of GTAWed Aluminum Butt Joints Through FSP and T6 Heat Treatment” by **Gökçe Mehmet Gençer, Coşkun Yolcu, Fatih Kahraman.** Fusion welding is a commonly applied manufacturing process in all fields of industry. Some imperfections (formation of coarse-grained microstructure, decrease in mechanical property, etc.) can occur especially in the fusion welding-based fabrication of aluminum alloys which have specific features, such as having high thermal conductivity, expansion coefficient, high hydrogen solubility in the liquid state, and oxide layer on the surface. Therefore, the enhancement of microstructure and mechanical properties in terms of the lifespan and strength of the fusion-welded joints is crucial for most applications. In the study, the effects of friction stir processing (FSP) and T6 heat treatment, applied as post-weld processing, on the weld zone properties of the gas tungsten arc welded (GTAWed) AA6082 plates were investigated. The effects of the post-weld processings (FSP and T6 heat treatment) on mechanical and microstructural features were analyzed via microstructural examination and microhardness measurements and tensile strength testing. It was observed that the dendritic microstructure in the processed region (stir zone) of the weld bead was destroyed and fine-grained microstructure was formed via FSP. Additionally, the findings showed that heat input occurred during FSP led to broaden of heat affected zone (HAZ) and decrease the hardness in a wider region. It was also determined that the mechanical characteristics of the GTAWed joint were increased but in contrast, the toughness was decreased through T6 post-weld heat treatment.*

*The our fifth article is titled “Welding Order and Welding Penetration Levels’ Impact on Product Life Cycle For GMAW” by **Ceren Bilgili, Sibel Uygun, Gizem Yılmaz.** Gas metal arc welding is a high-speed, economical process that is also called as "metal inert gas welding" or "metal active gas welding" which are sub-types of gas metal arc welding. This method is used for production of different parts in many industries. In this paper, the focus will be on automotive applications of this process and the impact of the parameters of this production method on the durability performance of the axle component of a vehicle. Experiments have been conducted on the axles that have been produced in serial life production conditions and have been investigated under real life road load conditions to determine their performance levels. After theoretical calculations and physical tests, each measured improvement had been documented for every parameter of the welding process. All this data had been analyzed in detail and these parameters’ projected impacts on the axle life cycle had been evaluated with respect to the serial life usage condition expectations.*

*The our sixth and final article is titled “Elasto-Plastic Deformation of a Liquid Ammonia Storage Tank” by **Göksel Saraçoğlu.** This paper presents the elasto-plastic deformation of the inner bottom plate of a 10,000 tonnes capacity double wall liquid ammonia storage tank used in a chemical fertilizer plant. It has been determined that the problem encountered in the bottom plate of the tank where the raw material is stocked at -33°C is caused by the rapid cooling of the tank after the internal maintenance. Mechanical tests performed on the sample cut from the bottom plate showed that the plastic deformation occurred at a rate of 1.94%, but the toughness was at a level that did not require a change. Therefore, it is foreseen that the use of the bottom plate can be continued by complying with the 1°C/hour heating and cooling rule in accordance with the relevant standard API-620.*

You can also view the journal on the web page www.mmo.org.tr/muhendismakina, <https://dergipark.org.tr> and support us with your articles and comments.

Best regards until our next issue...

UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS
Board of Directors



Yol Kaynaklı Titreşimlerin Taşınan Ürün Üzerindeki Etkilerinin Canlandırılması İçin Bir Test Ekipmanı Konseptinin Geliştirilmesi

Serdar Murat Demirel¹

ÖZ

Endüstride, üretilen ürünlerin uygun şekilde ambalajlanması ve taşınması da en az üretimi kadar önem taşımaktadır. Bu nedenle, karayolu taşımacılığında ürünlerin üzerine en çok etkiyen kuvvet olan titreşim kaynaklı kuvvetlerin ürün üzerindeki etkilerinin bilinmesi ürün ve ambalaj tasarımında önemli rol oynamaktadır. Bu amaçla, sürücü ve yolcu konforu için daha önceden yapılan çalışmaların aksine yol titreşimlerinden kaynaklanan kuvvetlerin ürün üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesini sağlayacak, işletmelerde konumlandırılabilir sabit bir test ekipmanı konsepti geliştirilmesi için bu çalışma yapılmıştır. z-ekseni (yer çekimine paralel) doğrultusundaki titreşimleri oluşturabilmek için tamburlu sistem tercih edilmiştir. Bununla beraber, matematiksel olarak elde edilen fonksiyonların CAE metotları ile doğrulanması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Titreşim, test, yol

Development of A Test Equipment Concept For Reviewing The Effects of Road Generated Vibrations on the Transported Product

ABSTRACT

In the industry, proper packaging and transportation of the products is at least as important as its production. Therefore, knowing the effects of vibration-induced forces on the product, which is the most effective force on the products in road transport, plays an important role in product and packaging design. For this purpose, this study has been carried out to develop a stationary test equipment concept that can be positioned in enterprises, which will enable the effects of the forces arising from road vibrations to be observed on the product, contrary to previous studies for driver and passenger comfort. In order to generate vibrations in the z-axis (parallel to gravity) direction, a drum system is preferred. In addition, the mathematically obtained functions were verified with CAE methods.

Keywords: Vibration, test, road

Geliş/Received : 03.11.2021

Kabul/Accepted : 27.04.2022

¹ ETİ Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş., Eskişehir
smdemirel@etimakine.com.tr, ORCID: 0000-0003-1503-4206



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the industry, fast production and costs are much more important than before. For this reason, significant earnings in terms of speed and costs can be achieved in product development studies by using developed technological opportunities. Recently developed simulation systems and methods come to the fore in obtaining these advantages. Simulation can be done not only by numerical methods, but also by increasing the accuracy with the feedback of the numerical results obtained from the experimental data.

One of the prior studies is a vibration analysis done with a mathematical model and a simulation equipment. In particular, vibration analysis has a great importance for vehicles used in land transportation and highway construction, which is one of the most preferred transportation methods.

In this study, it is aimed to analyze the vibrations that the products with logistics are exposed to during transportation. For this reason, the simulation method of long-term scenarios based on relatively short-term and non-displacement experimental data was preferred. The aim of the study is to develop a prototype test equipment that can simulate long-term transportation effects on goods by using experimentally measured vibration data. Thus, equipment design will be developed that can obtain a basic data set, especially for the development of packaging.

Objectives

In the literature, Nguyen et al. studied on the ride comfort of a vibratory roller, which can be used to compact asphalt and soil. In this study, the improvements made in order to contribute to the increase of both comfort and occupational safety of the operator are supported by simulation and mathematical calculations [1]. In addition, Ren et al. have also reported a study to reduce the effects of vibrations, which are frequently exposed to special machine/equipment operators, on physical and mental health. It has been observed that the vibration characteristic in the vehicle cabin measured by the sensor is compatible with the finite element method [2]. Especially in automotive, the number of studies carried out to detect road-bourne vibrations and to reduce their reflections in the cabin in vehicle development studies is quite high. Butkunas mentioned random vibration analysis in his study in 1969 and explained that this method is used in industrial vehicle development [3]. In another study on this topic, research and calculations were carried out to accurately measure road profiles. For this purpose, a computer simulation was made with a mathematical model [4]. In another vibration analysis study on automobiles, vibrations in the interior mirrors of automobiles were analyzed. In the study, it is aimed to prevent the distortions that may occur in the view by reducing the vibrations in the interior mirror and to prevent the mirror from being damaged. For this reason, vibration analyzes were carried out using the finite element analysis method [5]. Vibration analysis and related simulation studies and mathematical modeling have generally been carried out to increase driver and passenger comfort. Another mathematical method used in studies on vibration is seen as vehicle-track coupled dynamics. This method can be used alone, or it can be evaluated in a hybrid way, supported by different numerical methods and experimental studies [6]. It is very important to examine the effects of vibration in order to delay the fatigue caused by vibrations. Therefore, different methods have been used, such as the equivalent damage method. In the study of Coulon et al., the results of the study carried out according to the IEC 61 373 standard were examined and the operability of the standard was tested [7]. In addition, there is also a study that examines the effects of vibration caused by wear in the wheel-gear box system on high-speed railway vehicles, based on transportation. In mentioned study, Liu et al. designed an exact scale equipment and simulated the mathematical model with solid modeling. As a result of the study, percentage data related to wheel wear and track irregularity were obtained [8].

Methods

In this study, in order to analyze the forces acting on goods during long-term transportation, real road data is gathered using a calibrated accelerometer device fixed to the ground on the truck bed, and 3-axis vibration data was recorded along the road. The obtained data were reduced, analyzed and converted into a design parameter.



The mathematical method depends on rotating a cam placed on a drum with fixed diameter of 600mm with variable speeds to obtain desired acceleration values with a maximum known displacement of 36mm. The cam path must be free of discontinuities.

A mass and spring/damper duo can be added to the constructed system, as in vehicles. In this paper, 4 different diameter followers and 3 different spring constants for a fixed 750kg load were worked on.

Discussion and Conclusions

In this study, it is aimed to develop a test device that predicts the forces that industrial products will be exposed to while they are on their way for shipment, thus enabling precautionary measures to be taken. In this context, the “drum system”, which can only measure in the z-axis, was preferred among 5 different systems. This is because the forces in the z-axis are greater during the transport of the products and the equipment costs are lower. Along with the drum system, a mathematical model that can verify the results has also been created. For a fixed 750kg load, 4 different diameter trackers and 3 different spring constants were studied.

In order for a test device to be designed as desired, it is necessary to design a cam that will ensure constant contact between the cam and the follower in the system. The system can respond to approximately 62% of the acceleration values required at the desired exposure times. All acceleration values can be obtained if the exposure time is not observed. If suspension (spring-damper) is used in the system, realistic results can be obtained, but the system must be “intelligent” as different values will be obtained depending on the amount of load on each load. The system can be operated at different speeds before the operation, the acceleration values depending on the engine speed are extracted and then scenarios are applied according to these values..

As a result of the study, the requirements for a test equipment that can simulate the forces that the products will be exposed to in the logistics have been determined, tested and a mathematical model has been put forward. The accuracy of the created mathematical model was verified by comparing it with the data received from the test equipment. The results obtained in this study can be used to arrange test equipment in different combinations for the desired conditions. In future studies, trials can be made for different sizes and different products.

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde hız ve maliyet eskiye nazaran çok daha yüksek önem taşımaktadır. Bu nedenle de gelişen teknolojik imkanlar kullanılarak ürün geliştirme çalışmalarında hız ve maliyetten önemli kazançlar elde edilebilmektedir. Bu avantajların kazanılmasında, son dönemde gelişen simülasyon sistem ve yöntemleri öne çıkmaktadır. Simülasyon, yalnızca nümerik yöntemlerle değil deneysel verilerden alınan sayısal sonuçların geri beslemesiyle doğruluğu artırılarak da yapılabilmektedir.

Matematik modeller ve simülasyon ekipmanları ile yapılan çalışmalardan biri de titreşim analizleridir. Özellikle, en çok tercih edilen ulaşım yöntemlerinden biri olan kara ulaşımı ve karayolu yapımında kullanılan araçlar için titreşim analizi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde bu konuyla ilgili, kullanılan yöntem ve simüle edilen senaryolar ile birbirlerinden ayrılan çalışmalar mevcuttur. Nguyen ve arkadaşları, asfalt ve toprak sıkıştırmak için kullanılabilen titreşimli silindirin sürüş konforu ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, operatörün hem konfor hem de iş güvenliğinin artırılmasına katkı sağlayabilmek adına yapılan geliştirmeler simülasyon ile beraber matematik hesaplarıyla da desteklenmiştir [1]. Bununla beraber, Ren ve arkadaşları da özel makine/ekipman operatörlerinin sıklıkla maruz kaldıkları titreşimlerin, fiziksel ve ruhsal sağlığa etkilerinin azaltılması için bir çalışma yapmışlardır. Sensör vasıtasıyla ölçülen araç kabini içerisindeki titreşim karakteristiğinin sonlu eleman yöntemiyle uyumlu olduğu gözlenmiştir [2]. Özellikle otomotivde, araç geliştirme çalışmalarında yol kaynaklı titreşimlerin tespiti ve kabin içerisine yansımalarının azaltılması için yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Butkunas, 1969 yılında gerçekleştirdiği çalışmasında rastgele titreşim analizinden bahsetmiş ve bu yöntemin endüstriyel olarak araç geliştirmede kullanıldığını anlatmıştır [3]. Bu konuyla ilgili bir diğer çalışmada, yol profillerini doğru bir şekilde ölçmek için araştırma ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için matematik model ile bilgisayar simülasyonu yapılmıştır [4]. Otomobillerle ilgili yapılan bir diğer titreşim analizi çalışmasında, otomobillerin iç aynalarındaki titreşimler analiz edilmiştir. Çalışmada, iç aynadaki titreşimlerin azaltılması ile görüntüde oluşabilecek bozulmaların engellenmesi ve aynanın hasar görmesinin önlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle sonlu eleman analizi yöntemi kullanılarak titreşim analizleri yapılmıştır [5]. Titreşim analizi ve buna bağlı yapılan simülasyon çalışmaları ile matematik modellemeler, genellikle sürücü ve yolcu konforunu artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Titreşim ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan bir diğer matematiksel yöntem ise araç kaynaklı dinamik (vehicle-track coupled dynamics) olarak görülmektedir. Bu yöntem, tek başına kullanılabildiği gibi farklı nümerik yöntemlerle ve deneysel çalışmalarla desteklenerek hibrit şekilde de değerlendirilebilmektedir [6]. Titreşimlerin yarattığı yorulmaların geciktirilmesi amacıyla, titreşim etkilerinin ince-



lenmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle, eşdeğer hasar yöntemi gibi farklı yöntemler kullanılmıştır. Coulon ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, IEC 61 373 standardına göre yapılan çalışmanın sonuçları irdelenmiş ve standardın çalışırılığı test edilmiştir [7]. Bununla beraber, taşımacılığı baz alarak, yüksek hızlı demiryolu araçları üzerinde tekerlek-dişli kutusu sistemindeki aşınmalardan kaynaklı titreşim etkilerini birebir boyutta inceleyen bir çalışma da mevcuttur. Bahsedilen çalışmada Liu ve arkadaşları, birebir boyutlu bir ekipman tasarlamış ve katı modelleme ile simülasyonu gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, tekerlek aşınmaları ve palet düzensizliği ile ilgili yüzdelik verilere ulaşılmıştır [8].

Bu çalışmada ise, lojistiği sağlanan ürünlerin taşınması sırasında maruz kaldıkları titreşimlerin ürün üzerindeki etkilerini canlandırabilen bir sistemin tasarlanması amaçlanmıştır. Bu nedenle, uzun süreli senaryoların nispeten kısa sürede ve yer değiştirme gerektirmeyen ayrıca deneysel verilere dayalı bir simülasyonu yöntemi tercih edilmiştir. Çalışmanın amacı, ürünlerin veya malzemelerin taşınması esnasında maruz kalabilecekleri deneysel verilere dayalı titreşimler ve buna bağlı etkilerin gözlemlenebileceği, bir prototip test ekipmanı geliştirmektir. Böylece, taşınma süreçlerine göre ambalajların geliştirilmesi için bir temel veri seti elde edebilecek ekipman tasarımı geliştirilmiş olacaktır.

2. MATERYAL & METOT

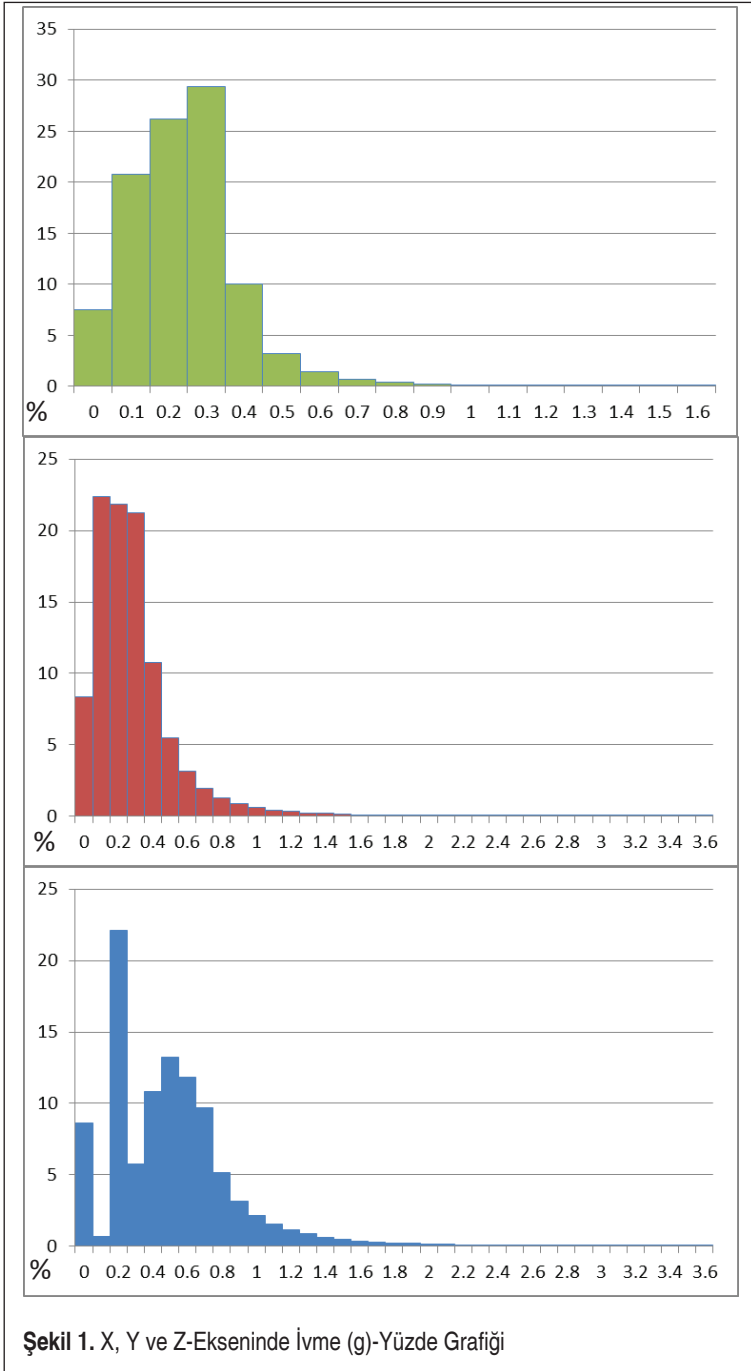
Bu çalışmada, yol titreşimlerini ölçen ve bu sayede uzun süreli hareketlerde malzeme veya ürünlerin üzerine etkileyen kuvvetlerin analizini yapabilen bir prototip test ekipmanı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, farklı konseptler incelenerek, en uygun deney sisteminin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk adımında, gerçek çalışma ortamındaki titreşim verilerinin ölçülmesi için kalibre edilmiş bir ivme ölçer cihazının kamyon kasası üzerinde zemine sabitleyerek yol boyunca 3 eksenli titreşim verisi kaydedilmiş, elde edilen veriler indirgenerek analiz edilip tasarım parametresine dönüştürülmüştür. İşlenen verilerden elde edilen sonuçlar Tablo 1'deki gibidir.

X, Y ve Z eksenleri için ivme değerlerinin tekrarlanma yüzdeleri Şekil 1'de sırası ile gösterilmektedir.

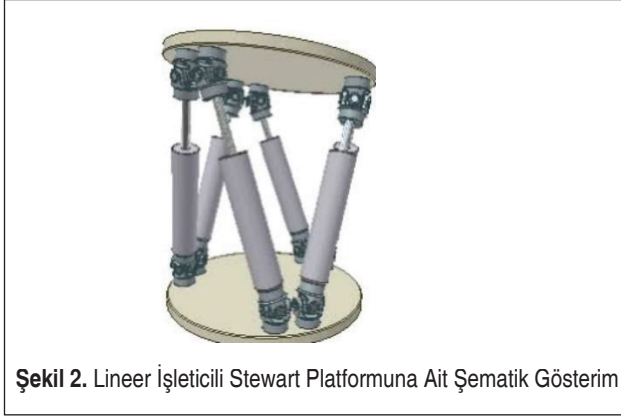
2.1 Konseptler

Yapılan değerlendirmede, bu çalışma için kullanılacak 5 farklı konseptin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bu konseptler, lineer işleticili Stewart platformu, rotary Stewart platformu, vidalı milli Kartezyen sistem, kayan kranklı Kartezyen sistem ve tamburlu sistem olarak belirlenmiştir.



Stewart Platformu

Bir Stewart platformu, platformun taban plakasındaki üç konuma çiftler halinde bağlanan ve bir üst plaka üzerinde üç montaj noktasına geçen, genellikle hidrolik krikolar veya elektrikli lineer aktüatörler olmak üzere altı prizmatik aktüatöre sahip bir tür paralel manipülatördür. 12 bağlantının tümü üniversal mafsallar aracılığıyla yapılır. Üst plakaya yerleştirilen cihazlar, serbestçe asılı duran bir cismin hareket etmesinin mümkün olduğu altı serbestlik derecesinde hareket ettirilebilir: üç doğrusal hareket x , y , z (yanal, boyuna ve dikey) ve üç dönüş (pitch, roll ve yalpalama).



Şekil 2. Lineer İşleticili Stewart Platformuna Ait Şematik Gösterim

Prototipleme ve düşük bütçeli uygulamalar için tipik olarak döner servo motorların yer aldığı rotary Stewart platformu kullanılır. Döner aktüatörlerin ters kinematiği için benzersiz bir kapalı form çözümü de mevcuttur.

Krank-biyel mekanizması, üç döner mafsallı ve bir prizmatik veya kayar mafsallı bir mekanizmadır [9]. Krankın dönüşü, kaydırıcının doğrusal hareketini yönlendirir ya da pnömomatik bir silindirin tahriği ile krankın dönüşünü sağlayabilir.

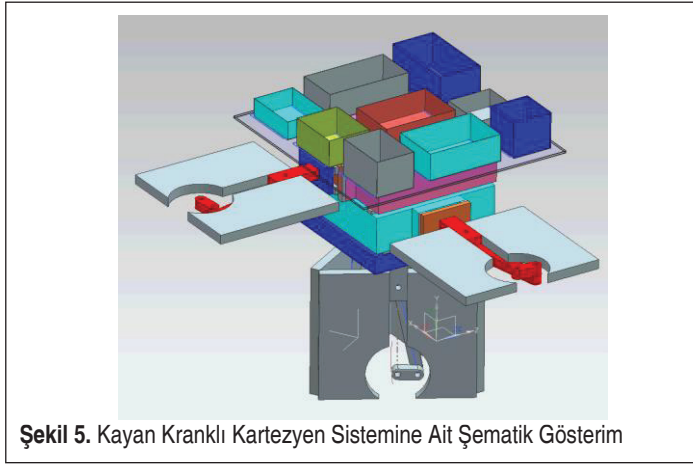
Tamburlu sistemlerde ise üzerinde farklı noktalarda ve farklı uzunluklarda yükselti-lerin bulunduğu bir tambur üzerinde harekete maruz kalan bir araba mevcuttur. Arabanın yükseltilere temas noktasında yol üzerindeki titreşimleri modelleyebilecek bir



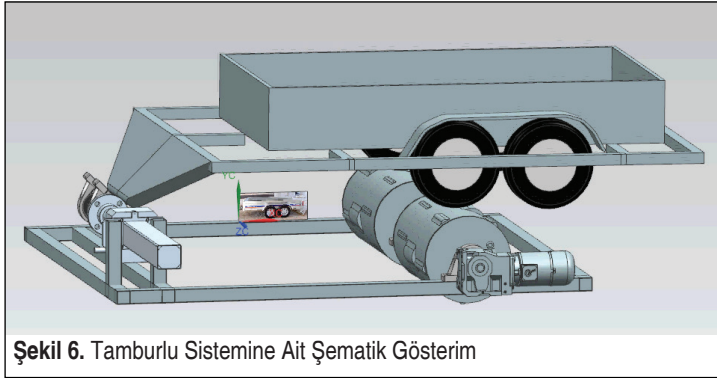
Şekil 3. Rotary Stewart Platformuna Ait Şematik Gösterim



Şekil 4. Vidalı milli Kartezyen Sistemine Ait Şematik Gösterim



Şekil 5. Kayan Kranklı Kartezyen Sistemine Ait Şematik Gösterim



Şekil 6. Tamburlu Sistemine Ait Şematik Gösterim

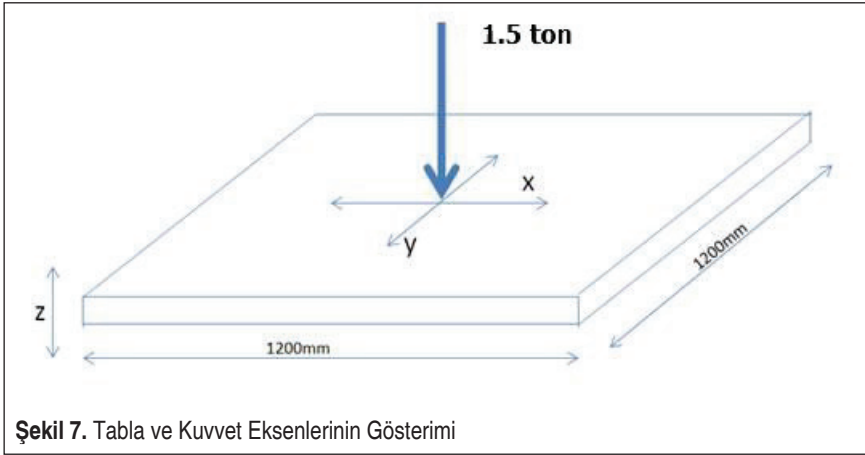
hareket sağlanmış olmaktadır. Bu hareket, bahsedilen sistem için z-ekseni doğrultusunda olmaktadır.

Karayolu taşımacılığında ürünlerin zarar görebileceği en yüksek etkilerin ve en çok

ivmenin z-ekseni doğrultusunda gerçekleştiği göz önünde bulundurularak yalnızca z ekseninde oluşan ivmelerden doğan etkileri oluşturabilen ve yukarıda bahsedilen diğer sistemlere göre düşük maliyetli olan tamburlu bir sistemin uygulanabilirliğinin incelenmesi kararlaştırılmıştır.

2.2 Tamburlu Sistem

Titreşim ölçümü için tasarlanacak olan prototip test ekipmanında tambur başlangıç parametresi olarak 600mm çapında seçilmiştir.



Z-ekseninde ölçülen değerler incelenerek, bu değerlerin adetsel anlamda %99,98'ini kapsayan (0 – 3,6g aralığındaki) Tablo 2'de veriler değerlendirmeye alınmıştır.

Tablo 2. z-Ekseninde Ölçülen 0-3,6g Aralığındaki İvme Değerleri

İvme (g)	z				
	Tekrar Sayısı	Ortalama Maruziyet Süresi (sn)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Frekans (1/sn)	Yüzde (%)
0	45531	0.163623	-2.9533	6.111626	8.6
0.1	3827	0.152339	0.001093	6.564322	0.72
0.2	117170	0.136095	36.78962	7.347786	22.13
0.3	30487	0.114952	0.009786	8.699262	5.76
0.4	57320	0.126731	26.40357	7.890752	10.83



0.5	70232	0.128325	23.58785	7.792732	13.26
0.6	62710	0.125449	0.00519	7.971374	11.84
0.7	51195	0.127629	0.004493	7.83523	9.67
0.8	27501	0.125957	0.003969	7.939202	5.19
0.9	16674	0.12497	-0.00125	8.00192	3.15
1	11471	0.123124	0.00758	8.121924	2.17
1.1	8357	0.120079	-0.03545	8.327853	1.58
1.2	6135	0.115746	-0.04029	8.639628	1.16
1.3	4554	0.115327	-0.02279	8.670982	0.86
1.4	3455	0.112996	-0.01625	8.849898	0.65
1.5	2634	0.11063	-0.04098	9.039121	0.5
1.6	2015	0.109727	-0.13294	9.113523	0.38
1.7	1566	0.110728	-0.26969	9.031142	0.3
1.8	1293	0.105491	0.005145	9.479472	0.24
1.9	985	0.106904	-0.03156	9.354226	0.19
2	844	0.112796	0.029463	8.865546	0.16
2.1	667	0.106372	-0.11376	9.400987	0.13
2.2	516	0.098643	-0.27858	10.13752	0.1
2.3	429	0.106993	-0.25953	9.346405	0.08
2.4	319	0.106897	-0.06135	9.354839	0.06
2.5	242	0.103719	-0.18352	9.641434	0.05
2.6	223	0.105381	-0.19034	9.489362	0.04
2.7	223	0.120852	0.041965	8.274583	0.04
2.8	151	0.111258	-0.31747	8.988095	0.03
2.9	117	0.109402	-0.38721	9.140625	0.02
3	93	0.107527	0.478607	9.3	0.02
3.1	97	0.109794	0.256027	9.107981	0.02
3.2	62	0.116129	-0.28473	8.611111	0.01
3.3	64	0.096094	-0.08724	10.4065	0.01
3.4	43	0.124419	0.066063	8.037383	0.01
3.5	47	0.12766	-2.57683	7.833333	0.01
3.6	37	0.098649	0.239459	10.13699	0.01

3. MATEMATİK MODEL

Bilinen maksimum 36mm'lik deplasmanı oluşturacak şekilde çapı bilinen bir tambur (600mm) üzerinde bir kamın (uygulamada bump) tasarlanarak istenen ivme değerini oluşturabilecek mümkün olan en yakın hızda döndürülmesi ile çalışan bir sistem düşünülmüştür.

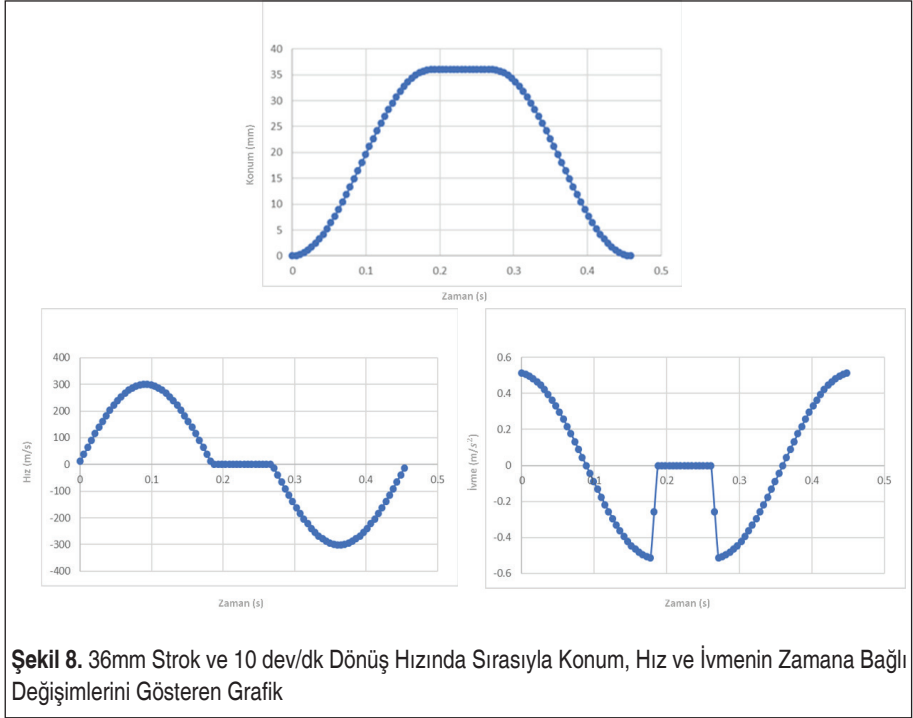
Kam yolu üzerindeki süreksizliklerin giderilmesi amacı ile yol basamak fonksiyonu $\left(\frac{1}{2}(1 - \cos z)\right)$ kullanılarak tasarlanmıştır.

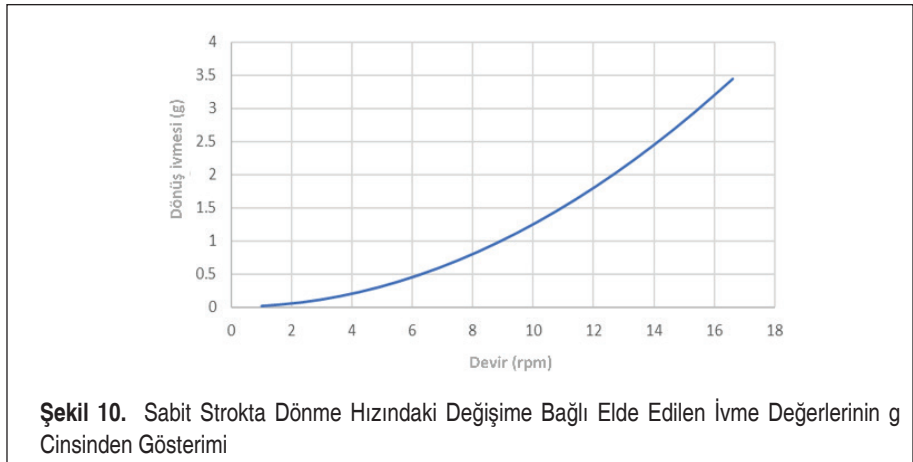
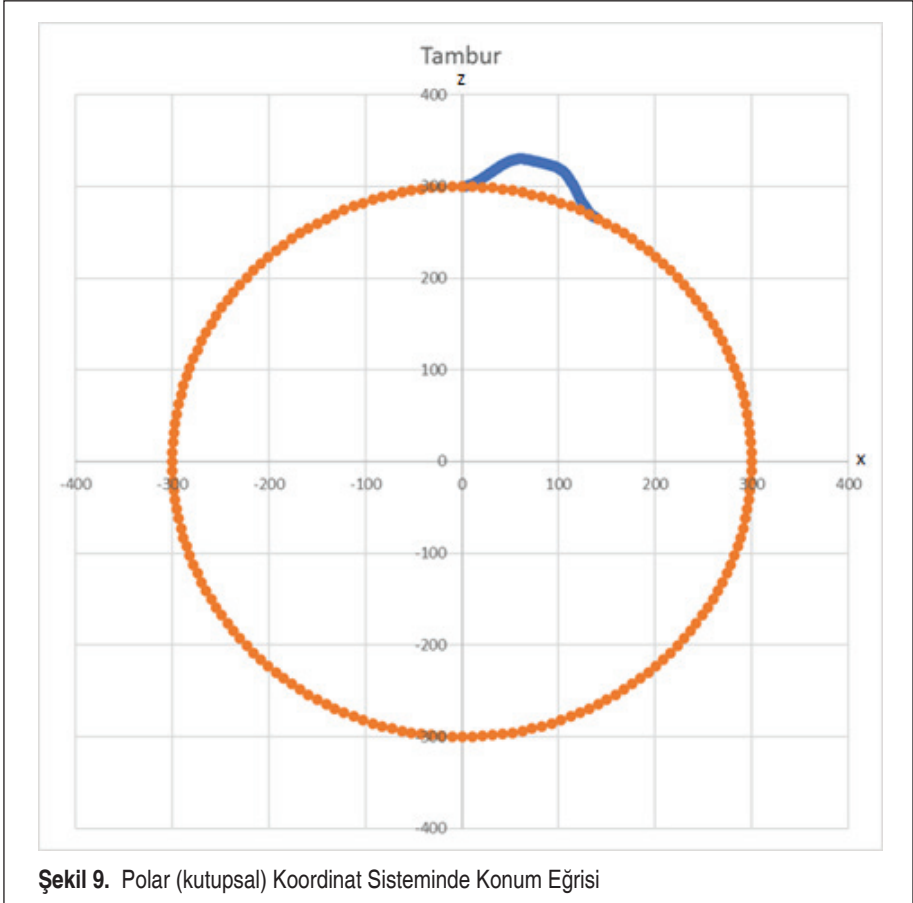
36mm'lik strok ve 10dev/dk'lık tambur dönüş hızı için konum, hız ve ivmenin zamana bağlı değişimleri Şekil 8'deki gibi olacaktır.

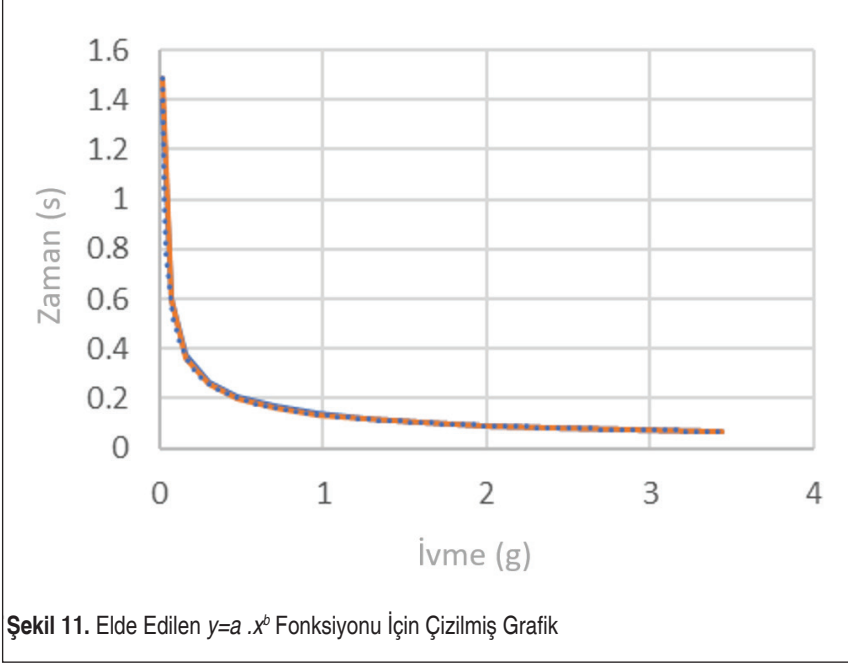
Konum için kullanılan eğri, polar koordinat sistemine çevrilip tambur üzerine sarılacak olursa Şekil 9'daki görünüm elde edilebilir.

Elde edilen bu tambur tasarımı çalışmanın ilerleyen safhasında NX ile yapılacak simülasyonlarda kullanılacaktır.

Hızdaki değişime bağlı olarak elde edilebilecek g cinsinden ivme değerleri ise Şekil 10'da yer alan grafikte gösterilmektedir.



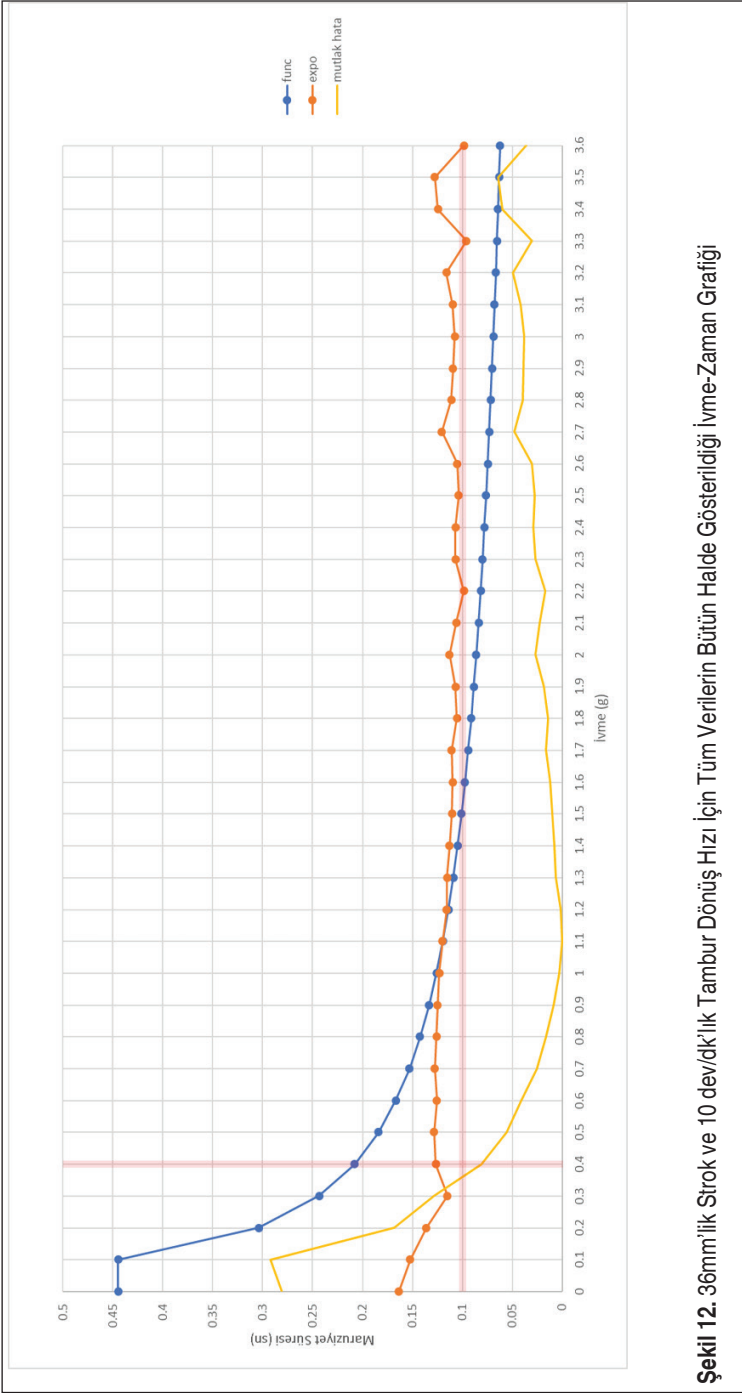




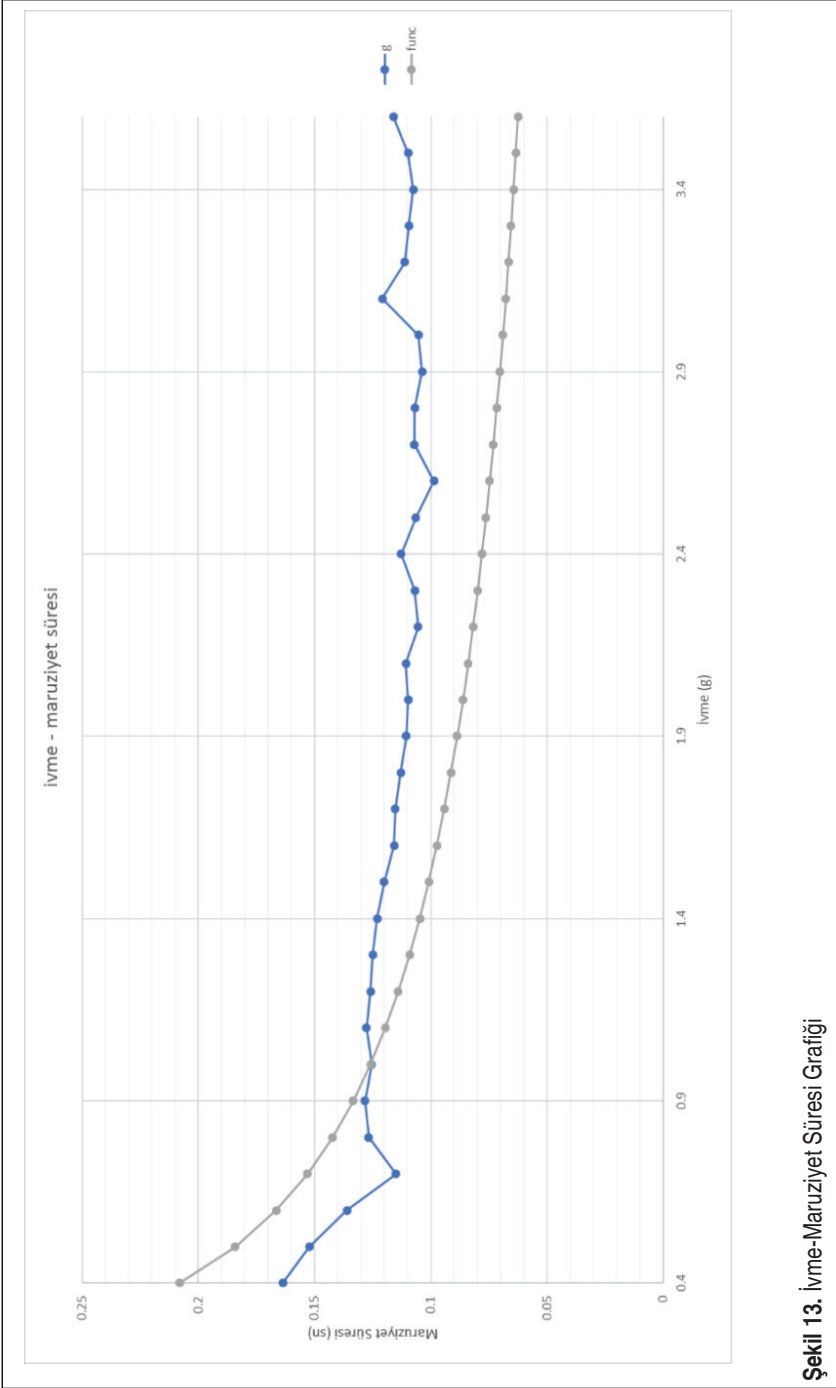
Dönüş hızına bağlı olarak elde edilen ivme miktarlarının maruziyet süreleri ise hesaplanan veriler kullanılarak $y=a .x^b$ cinsinden üstel bir fonksiyona çevrilebilir. Elde edilen fonksiyonun uygunluğu Şekil 11’deki grafikte gösterildiği gibidir.

Ölçüm değerleri (expo), bulunan fonksiyondan elde edilen değerler (func) ve mutlak sapma ([func-expo]) değerleri tek bir grafikte, Şekil 12’de gösterilmiştir.

0,1sn’lik mutlak hata eşik değeri olarak kabul edilecek olursa, 0,4 – 3,6g’lik ivme değeri aralığında ve en fazla 0,1sn’lik hata ile istenilen ivme miktarlarının üretilebildiği görülmektedir. Bu durumda toplam kapsama tüm ölçüm değerlerinin %62.77’sidir.



Şekil 12. 36mm'lik Strok ve 10 dev/dk'lık Tambur Dönüş Hızı İçin Tüm Verilerin Bütün Halde Gösterildiği İvme-Zaman Grafiği



Şekil 13. İvme-Maruziyet Süresi Grafiği

4. SAYISAL DOĞRULAMA

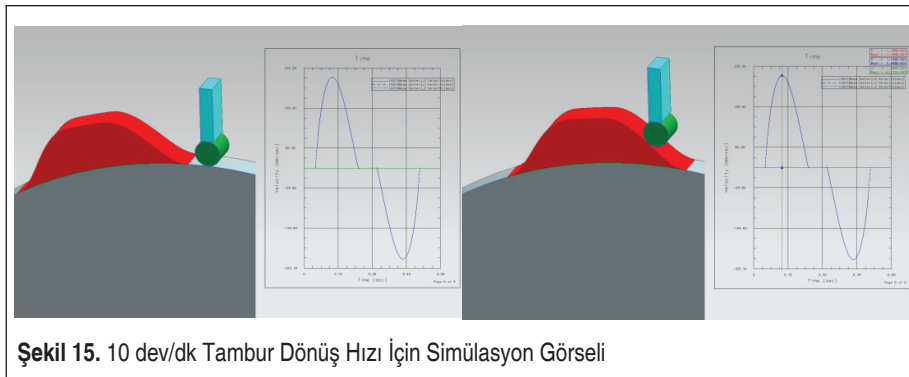
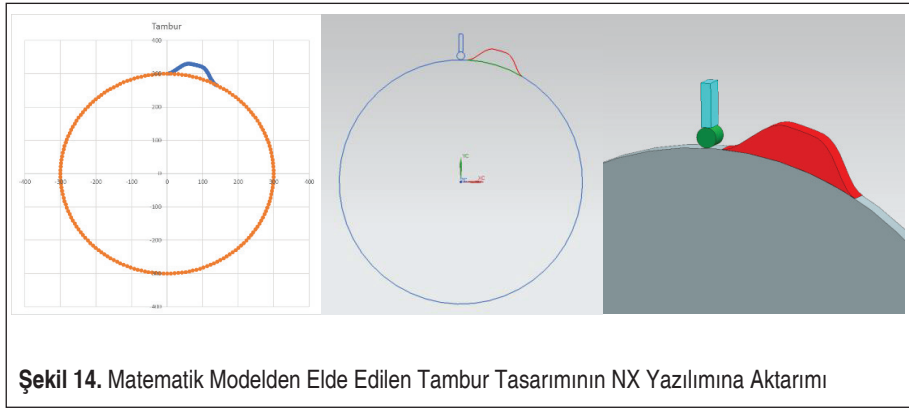
Matematik modelden elde edilen tambur tasarımı NX yazılımına Şekil 14'deki şekilde aktarılmıştır.

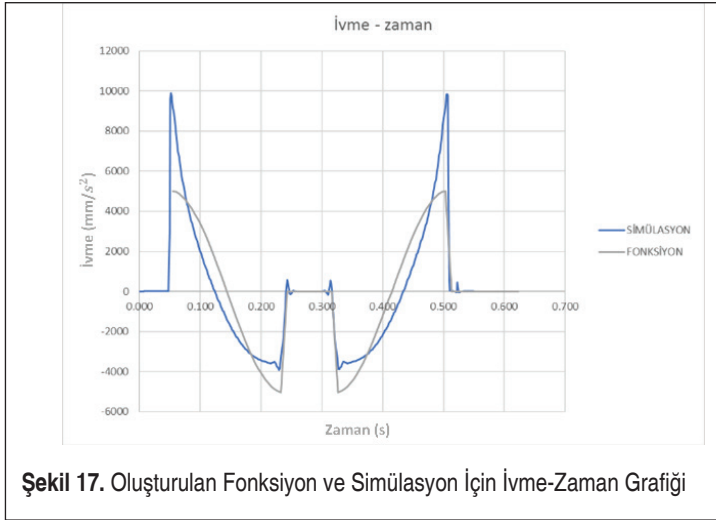
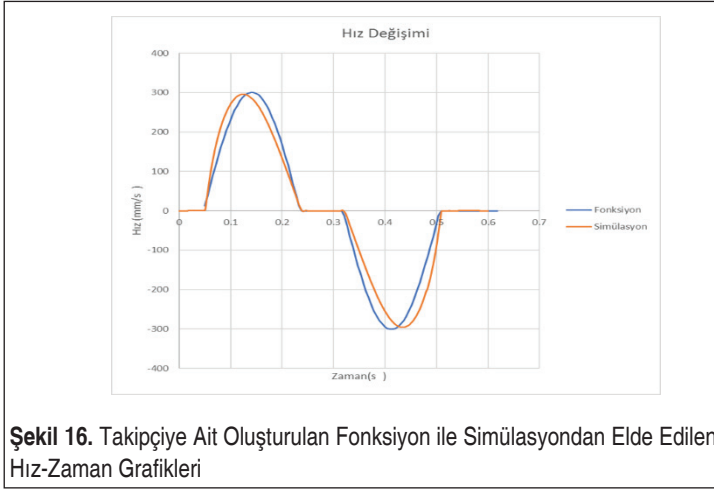
10 dev/dk'lık tambur dönüş hızı için simülasyon çalışmasına ait görsel Şekil 15'de sunulmuştur.

Noktasal takipçi için hazırlanan fonksiyon ile 20mm çapındaki takipçinin simülasyon sonucu oluşturduğu hız-zaman farkının grafiği Şekil 16'da sunulmuştur.

Bu farklılık ivme açısından incelendiğinde aynı maruziyet süreleri için çok daha yüksek ivme değerleri anlamına gelmektedir.

Bu durum, sistemde yer alacak takipçi çapının minimum boyutlarda olması gerekliliği olarak yorumlanmalıdır. Noktasal, Ø20mm ve Ø50mm takipçi için aynı koşullar altında ivmenin zamana bağlı değişimi Şekil 18'de gösterilmektedir.

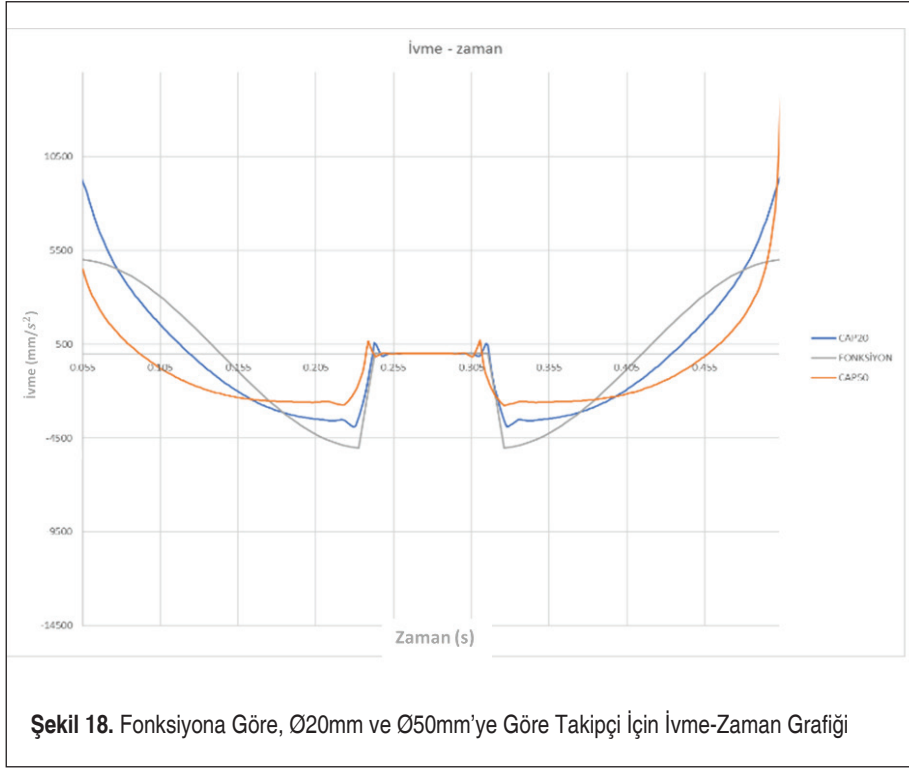




Araç tekerleği boyutunda bir takipçi kullanımı ile istenilen ivme değerlerinin elde edilebilmesi için özel bir kam yolu tasarımı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Sabit İvme

Hedeflenen temas süresince sabit bir ivme değeri elde etmek amacı ile, tekerlek temas noktasında aynı eğimi sağlayacak ve istenen strok değerini elde edecek şekilde kam yolu Şekil 19’da gösterildiği gibi yeniden düzenlenebilir. Ancak bu durumda strok miktarı değişecektir. Üzerinde çalışılan durum için strok 46,5mm artmaktadır.



Sabit Strok

Hedeflenen temas süresince istenen yer değiştirme miktarını sağlamak üzere, tekerleğin birim zamanda tek bir noktadan değmesi prensibinden yola çıkarak, sabit strok (36mm) gözetilerek kam yolu tasarlanacak olursa Şekil 18'de gösterilene benzer bir şekil ortaya çıkacaktır.

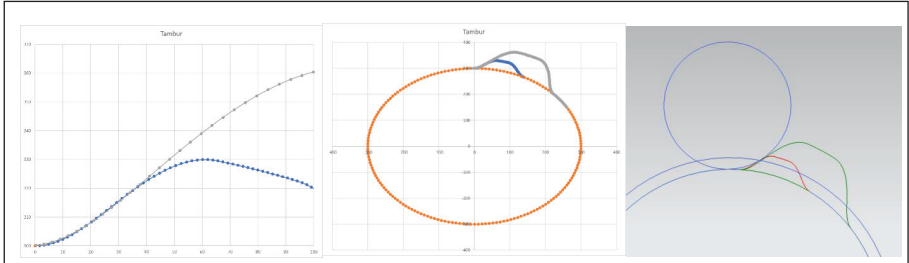
Aynı tambur dönüş hızında, Ø10mm ve Ø250mm'lik takipçiler için konum-zaman grafikleri Şekil 21'de gösterilmiştir.

Tambur dönüş hızında yapılan değişiklik ile iki eğrinin eğimleri arasındaki fark azaltılabilir.

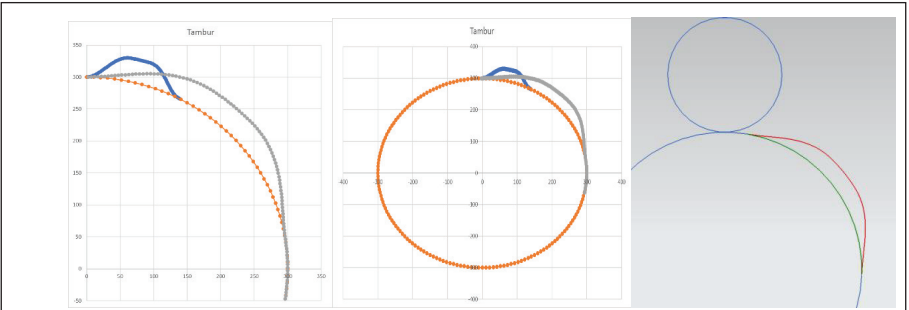
Tambur dönüş hızında yapılan değişiklik sonrasında Şekil 23'de gösterilen grafikler elde edilmiştir.

Benzer şekilde tüm devir aralıkları için 0-3,5g ivme aralığında tamburun hız değişimine bağlı ivme değerleri yeniden hesaplandığında Şekil 24'deki grafik elde edilir.

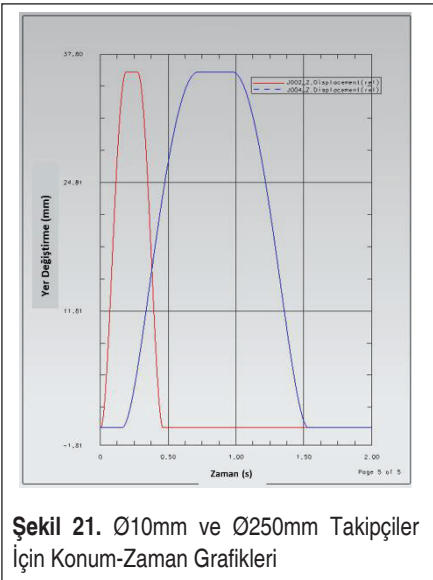
İvmeye bağlı maruziyet süreleri yeniden hesaplandıktan sonra, ölçülen maruziyet değerleri (expo), fonksiyondan elde edilen değerler (func) ve mutlak sapma [func-



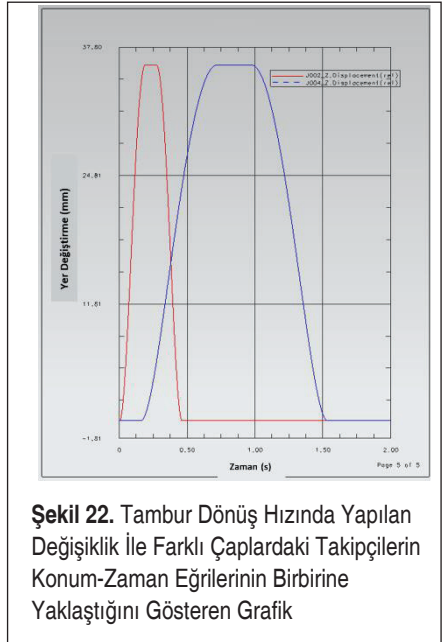
Şekil 19. Yapılan Düzenlenme Sonrası Kam Yolu



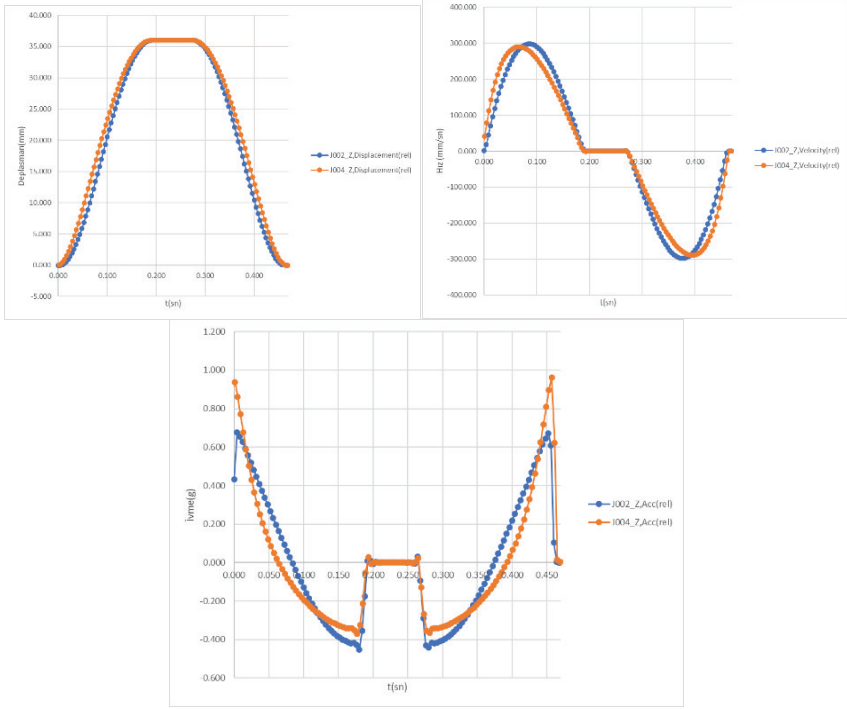
Şekil 20. 36mm sabit Strok Baz Alınarak Tasarlanan Kam Yolu



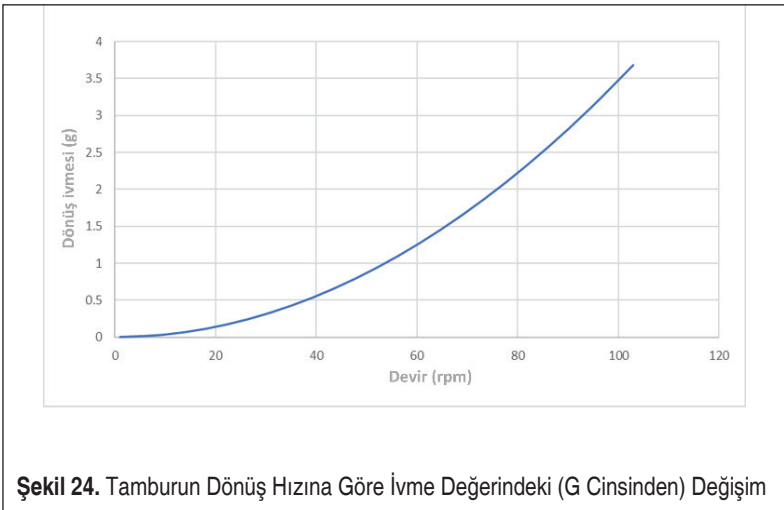
Şekil 21. Ø10mm ve Ø250mm Takipçiler İçin Konum-Zaman Grafikleri



Şekil 22. Tambur Dönüş Hızında Yapılan Değişiklik İle Farklı Çaplardaki Takipçilerin Konum-Zaman Eğrilerinin Birbirine Yaklaştığını Gösteren Grafik



Şekil 23. Tambur Dönüş Hızında Yapılan Değişiklik Sonrasında Sırasıyla; Konum-Zaman, Hız-Zaman ve İvme-Zaman Grafikleri



Şekil 24. Tamburun Dönüş Hızına Göre İvme Değerindeki (G Cinsinden) Değişim

expo] incelendiğinde 0,1sn'lik hata aralığında Şekil 12'deki grafikte gösterildiği gibi %62,77'lik kapsam alanının değişmediği görülmektedir.

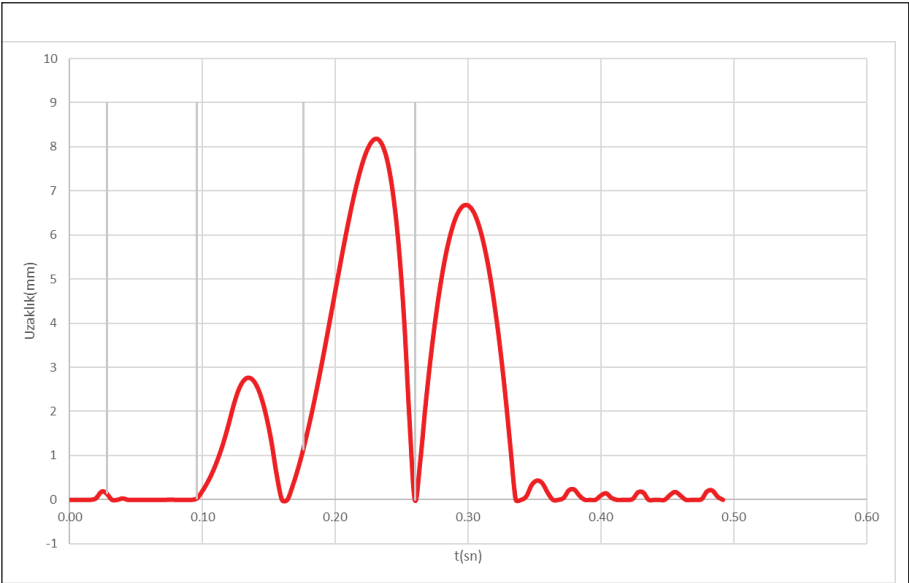
Sürekli Temas

Eksi yönlü ivmenin 1g'den fazla olduğu koşullarda, takipçi ile kam arasındaki temasın kesilmesi durumu ortaya çıkacaktır.

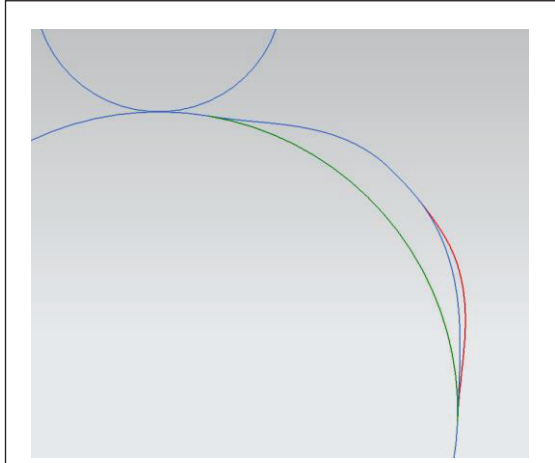
Yaklaşık 59dev/dk'lık tambur hızında, kam ile takipçinin temasını gösterir grafik Şekil 26'daki gibidir.

Bu problemin çözülebilmesi için alınabilecek önlemlerden biri özellikle ivme vektörü ile yerçekimi vektörünün eş yönlü olduğu durumda kam eğrisinin yumuşatılmasıdır. Bu sayede 1g altındaki ivmelerde temas korunmuş olur ancak bu durumda 1g'den büyük, negatif yönlü ivmeler, sistem tarafından uygulanamayacaktır. Bu sebeple sistemin takipçi ile kam arasındaki teması temin edecek ilave bir baskıya ihtiyacı bulunmaktadır. Bu baskının riski, toplam sistem ağırlığına ek bir kuvvetin kam-takipçi ikilisine aktarılıyor olmasıdır. Sürekli bir temas, yay kuvveti ile sağlanabilir ancak kamyon ile taşınan ürünlerin de negatif ivmelerde maksimum 1g kuvvete maruz kalması sebebiyle yay ile desteklenmiş, negatif ivme yönünde 1g'den fazla ivme üretmeyen bir kam tasarımı önerilmektedir.

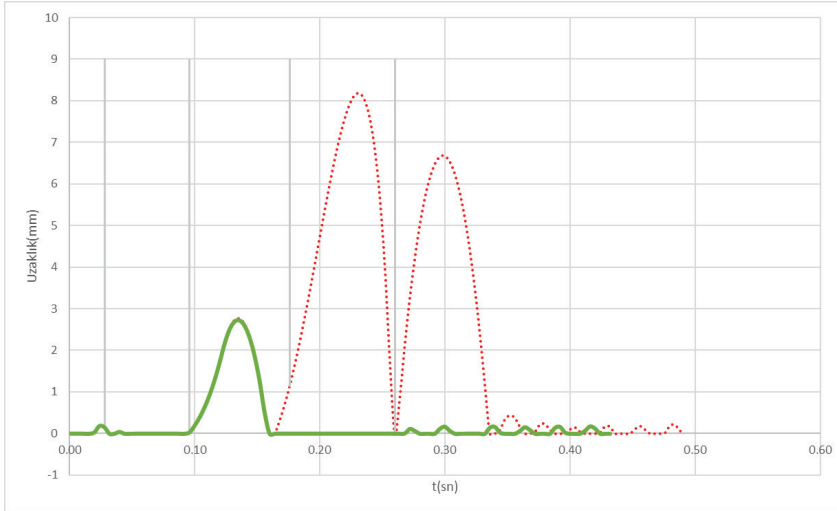
Yukarıdaki şekilde kırmızı ile gösterilen kam eğrisi, mavi olan ile değiştirilecek olursa, negatif ivme değerleri 1g'nin altında kalacağından temas kaybı yaşanmayacaktır.



Şekil 25. 59dev/dk Tambur Hızında, Kam ile Takipçi Temas Süresini Gösteren Grafik



Şekil 26. Kam Eğrisinin Gösterimi



Şekil 27. 59dev/dk'lık Tambur Hızında, Değiştirilmiş Kam ile Takipçinin Temas Grafiği

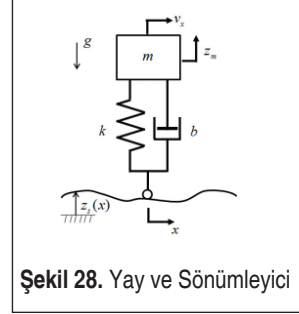
Yaklaşık 59dev/dk'lık tambur hızında, değiştirilmiş kam ile takipçinin temasını gösterir grafik Şekil 28'deki gibi olacaktır.

Yukarıdaki grafikte görüldüğü üzere tamburun 59dev/dk'lık dönüş hızında + yönde uygulanan ivme sonrasında takipçi ile kam arasındaki temas bir süreliğine kaybolmaktadır ve bu durum zıplama olarak tanımlanabilir.

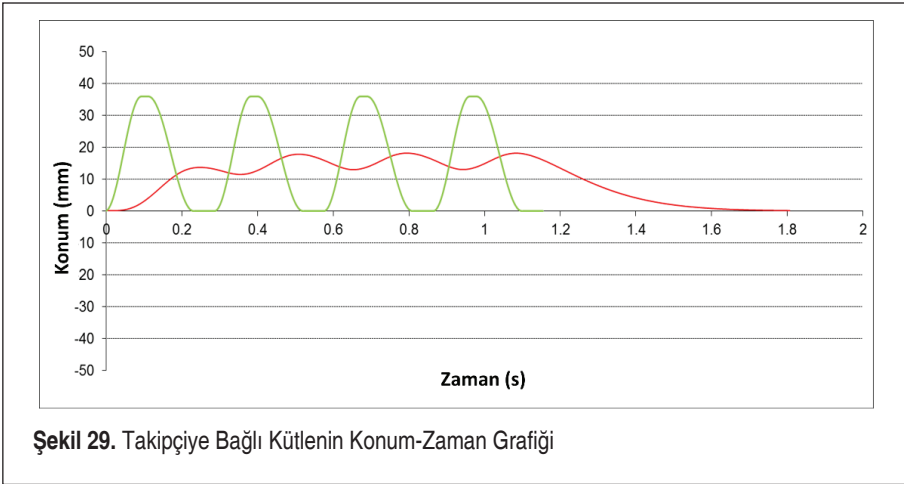
5. KÜTLE, YAY, SÖNÜMLEME ETKİSİ

Kurgulanan sisteme, araçlardaki gibi bir kütle ve yay/sönümleyici ikilisi eklenebilir.

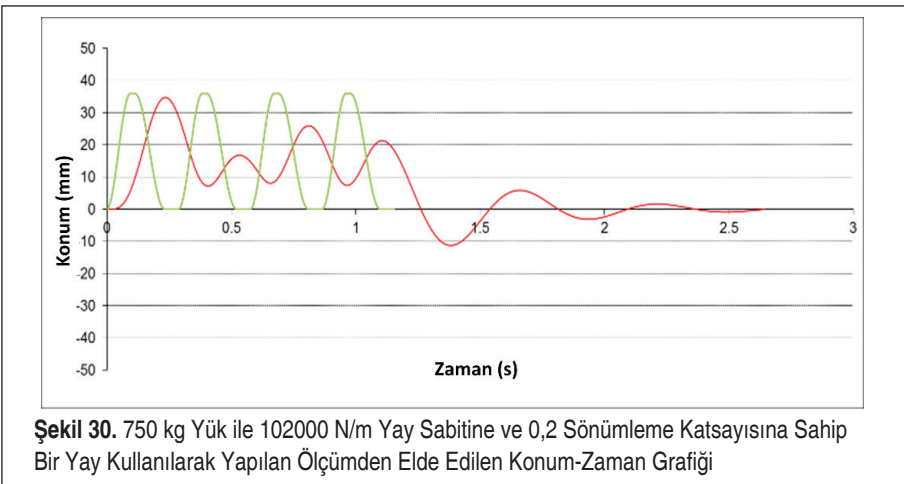
Takipçinin hareketinden, 3 tekrar için elde edilen konum/zaman fonksiyonu, yukarıdaki şekilde gösterilene benzer bir sistem içerisinde modellenir ve 750 kg'lık bir yük, 50000 N/m yay sabitine sahip bir yay ve 0,9 Ns/m sönümleme katsayısı (underdamped) senaryosu için takipçiye bağlı kütlelerin zamana bağlı hareketi Şekil 29'daki gibi elde edilmiştir.



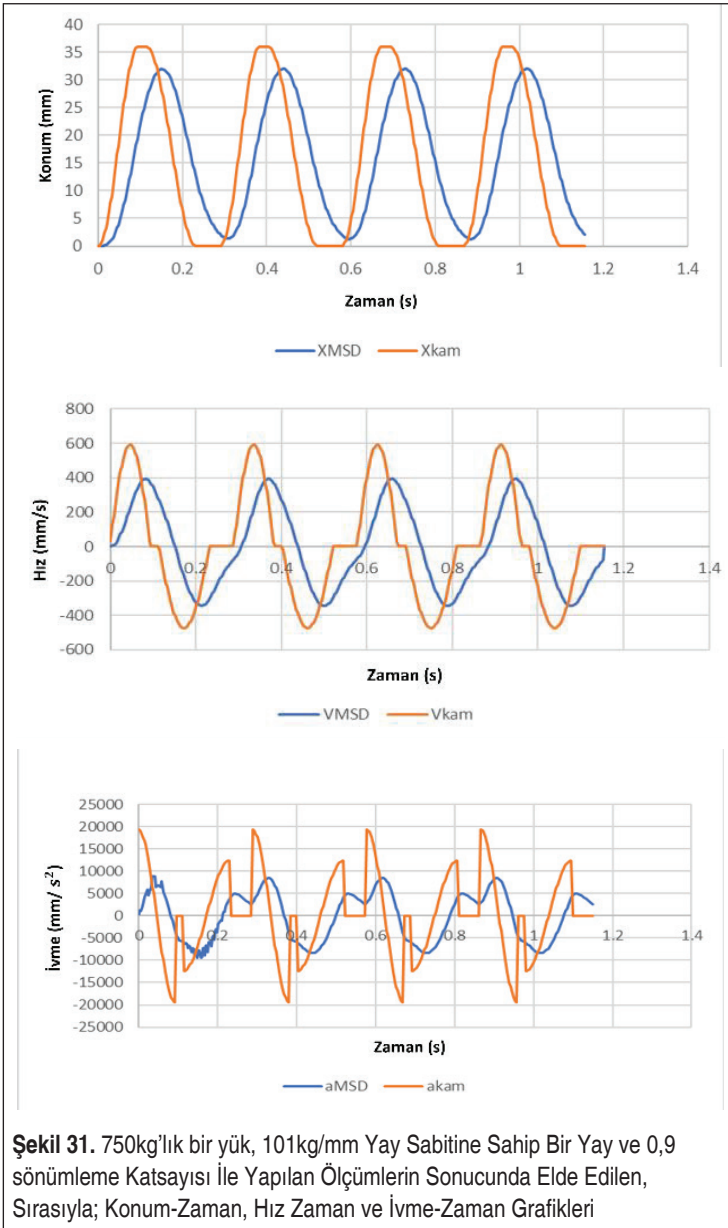
Şekil 28. Yay ve Sönümleyici



Şekil 29. Takipçiye Bağlı Kütlelerin Konum-Zaman Grafiği

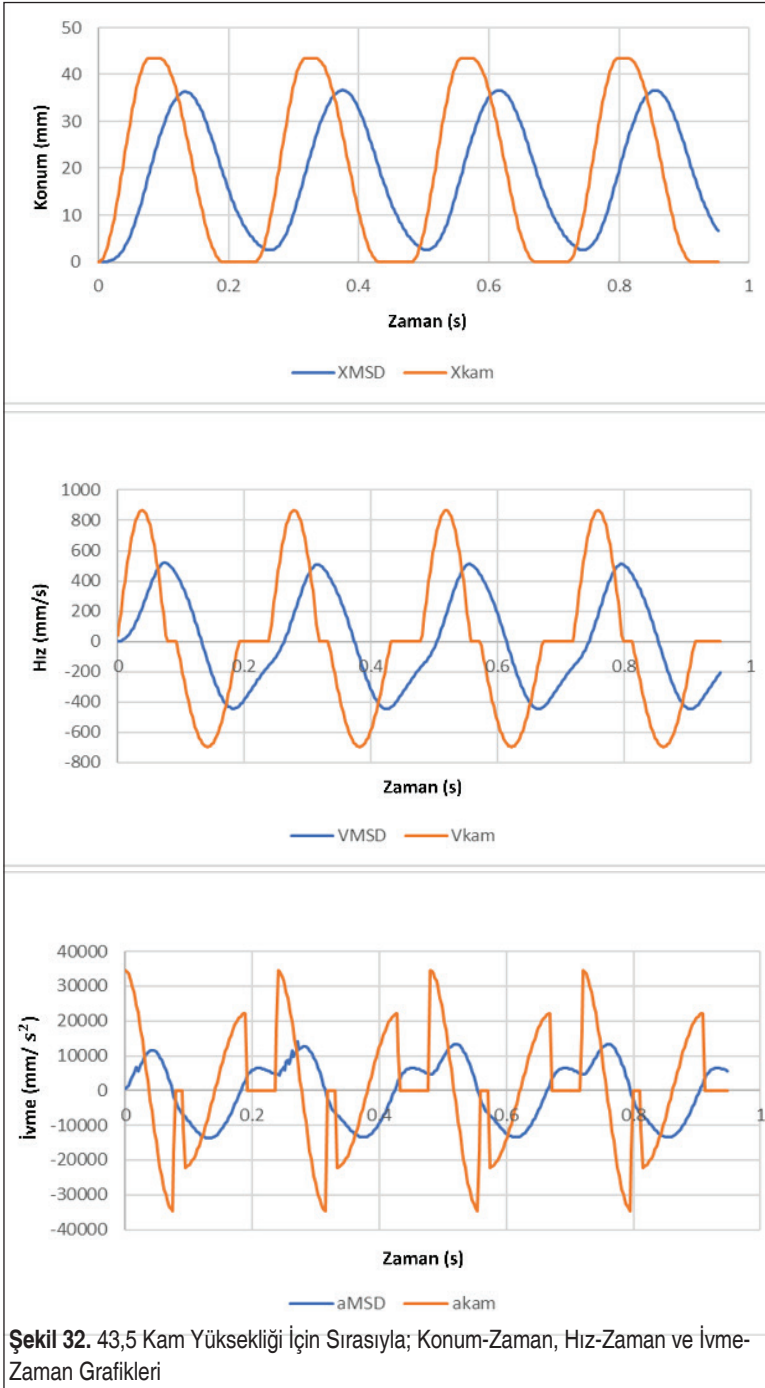


Şekil 30. 750 kg Yük ile 102000 N/m Yay Sabitine ve 0,2 Sönümleme Katsayısına Sahip Bir Yay Kullanılarak Yapılan Ölçümden Elde Edilen Konum-Zaman Grafiği

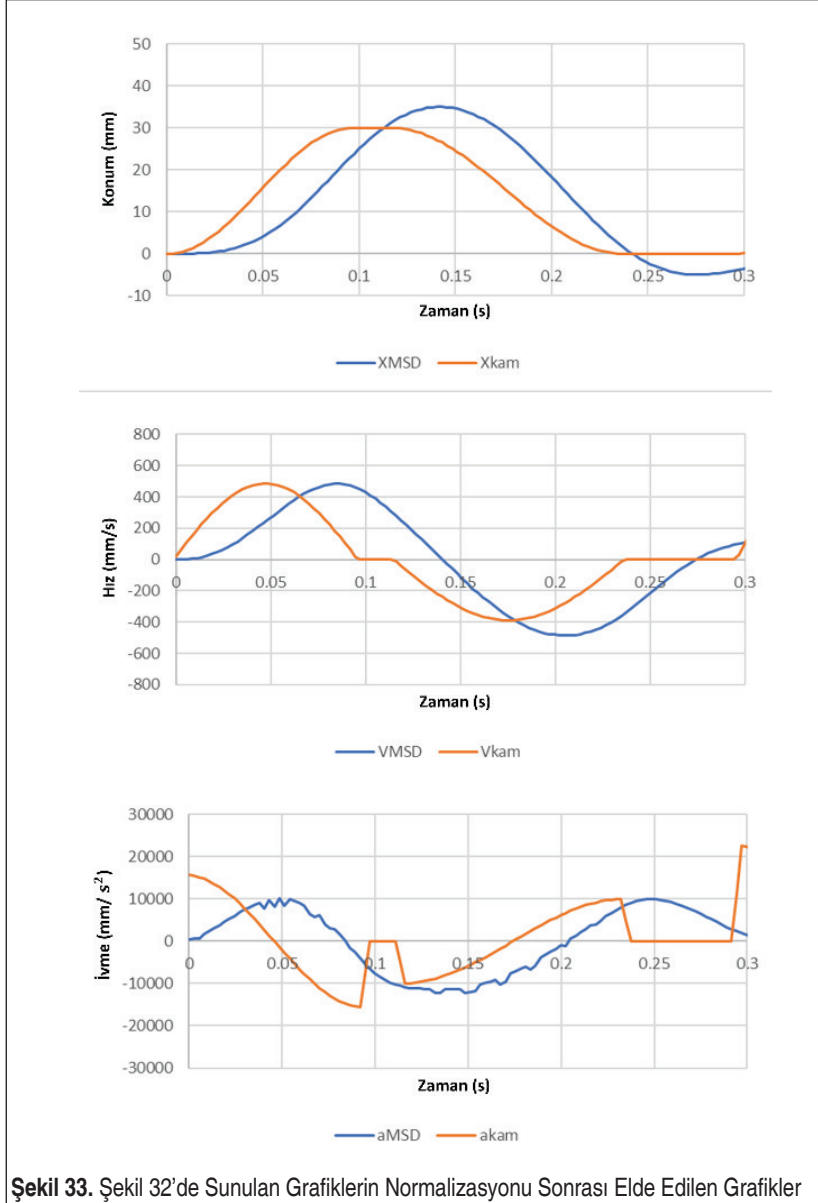


Benzer şekilde, 750 kg'lık bir yük, 102000 N/m yay sabitine sahip bir yay ve 0,2 Ns/m sönümlenme katsayısı ile yapılan ölçümler sonucunda Şekil 30'da yer alan grafik elde edilebilir.

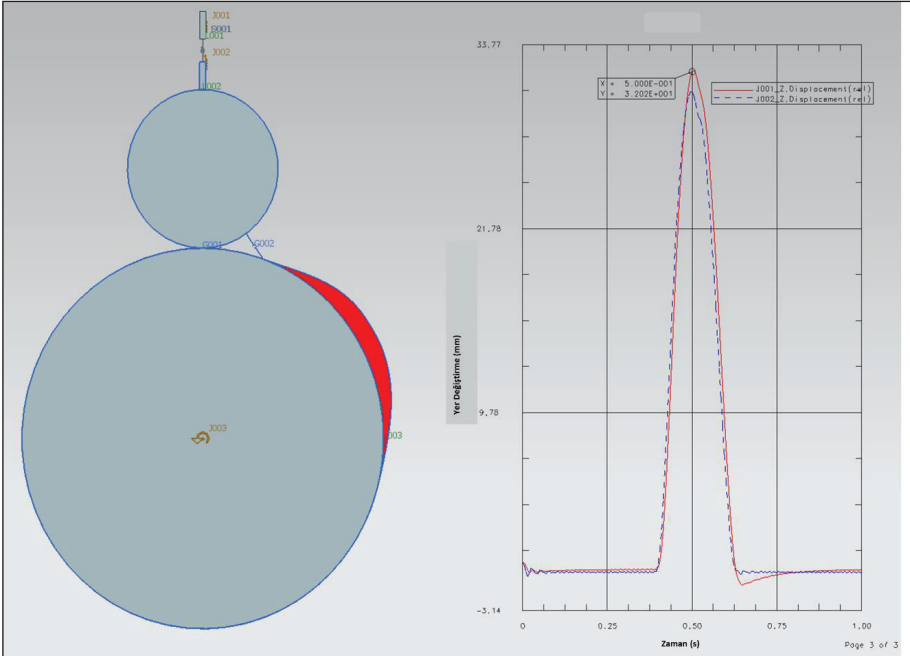
Sonuç olarak, Şekil 29 ve 30'daki grafiklerden de anlaşıldığı üzere matematiksel mo-



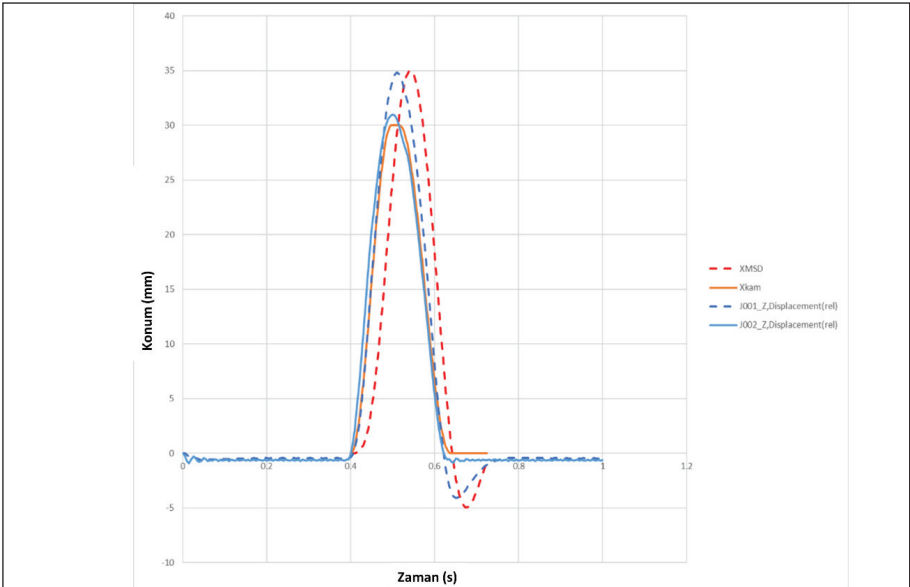
dele eklenmiş bir MSD'nin S ve D parametrelerinin doğru seçimi çok büyük önem arz etmektedir. 750 kg'lık bir yük, 1010 kN/m yay sabitine sahip bir yay ve 0,9 Ns/m sönümleme katsayısı (underdamped) senaryosu için, $x(t)$, $V(t)$ ve $a(t)$ grafikleri Şekil 31'deki gibi olmaktadır.



Şekil 33. Şekil 32'de Sunulan Grafiklerin Normalizasyonu Sonrası Elde Edilen Grafikler



Şekil 34. Sınır Koşullarının Birebir Modellendiği 3D Contact ile Yapılan Çalışma



Şekil 35. Deneysel ve MSD Matematiksel Modelden Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılmasına Ait Grafik



Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü üzere, istenen deplasman değeri için kam yeniden tasarlanmalıdır. 36mm'lik deplasmanın sağlanabilmesi için kam yüksekliğinin 43,5mm'ye çıkarıldığı durum Şekil 32'deki gibi olur.

Görüldüğü üzere deplasman sağlanmakta ancak, ivme değerleri sağlanamamaktadır. 30mm'lik kam deplasmanı için, ivme değerinin sağlanabilmesi amacıyla $x(t)$ grafiğinde normalizasyon yapıldığında aşağıdaki grafik seti elde edilir.

Kurulan MSD modelinin doğruluğu ve sürekli temas şartının sağlandığının kontrolü için, sınır şartlarının birebir modellendiği bir 3D_contact çözümü gerçekleştirilmiş ve Şekil 34'de sunulmuştur.

Simülasyon sonuçları ile MSD matematiksel modelinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafikte karşılaştırılmaktadır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, endüstriyel ürünlerin sevkiyat amacıyla karayolu üzerinde taşınması sırasında maruz kalacakları kuvvetlerin öngörülmesine olanak sağlayan ve bu sayede önceden önlem alınmasına imkan tanıyan bir test ekipmanı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 5 farklı sistem arasından, yalnızca z-ekseninde ölçüm verebilen “*tamburlu sistem*” tercih edilmiştir. Bunun nedeni, ürünlerin taşınması sırasında z-eksenindeki kuvvetlerin nispeten daha fazla olması ve ekipman maliyetinin daha düşük olmasıdır. Tamburlu sistem ile birlikte sonuçların doğrulanmasını sağlayabilecek bir matematiksel model de oluşturulmuştur. Sabit 750kg yük için 4 farklı çapta takipçi ve 3 farklı yay sabiti ile çözümler yapılmıştır.

İstenen biçimde bir test ekipmanının tasarlanması için sistemde takipçi ve kam arasında sürekli temas sağlanacak bir kam tasarımı zorunluluğu vardır. Sistem, maruziyet süreleri gözetilmez ise tüm ivme değerlerini, istenen maruziyet sürelerine karşılık gelen ivme değerlerinin ise yaklaşık %62'sini sağlayabilmektedir. Sistemde bir süspansiyon (yay-sönümleyici) kullanılması durumunda, gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir ancak her yüklemde yükün miktarına bağlı olarak farklı değerler elde edileceğinden sistemin “*akıllı*” olma zorunluluğu vardır. *Örnek olarak, sistemin işlem öncesinde farklı hızlarda çalıştırılarak motor hızına bağlı ivme değerlerini çıkararak sonrasında bu değerlere göre senaryoları uygulaması gösterilebilir.*

Çalışma sonucunda, ürünlerin lojistiğinde maruz kalacağı kuvvetleri simüle edilecek bir test ekipmanı için gerçek koşullardan elde edilen gereklilikler tespit edilerek bir matematik model ortaya konmuştur. Oluşturulan matematik modelin doğruluğu, simülasyonlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, istenen koşullar için gerekli olan test ekipmanının dizaynında kullanılabilir.



KAYNAKÇA

1. **V. Nguyen, J. Zhang, V. Le ve R. Jiao**, “Vibration Analysis and Modeling of an Off-Road Vibratory Roller Equipped with Three Different Cab’s Isolation Mounts,” *Hindawi*, p. 17, 2018.
2. **W. Ren, B. Peng, J. Shen, Y. Li ve Y. Yu**, “Study on Vibration Characteristics and Human Riding Comfort of a Special Equipment Cab,” *Hindawi Journal of Sensors*, cilt 2018, 2018.
3. **A. A. Butkunas**, “Random Vibration Analysis and Veichle Development,” *SAE Transactions*, cilt 78, no. 69001, pp. 536-547, 1969.
4. **C. S. Patel, P. P. Gohil ve B. Borhade**, “Modelling and Vibration Analysis of a Road Profile Measuring System,” *International Journal of Automotive and MEchanical Engineering*, cilt 1, pp. 13-28, 2010.
5. **B. S. Sadadeo ve M. C. Swami**, “The Vibration Analysis of Automobile Outer Rear View Mirror With Ist Development and Optimization,” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, cilt 4, no. 8, 2015.
6. **S. Qu, J. Yang, S. Zhu, W. Zhai ve G. Kouroussis**, “A hybrid methodology for predicting train-induced vibration on sensitive equipment in far-field buildings,” *Transportation Geotechnics*, no. 31, p. 100682, 2021.
7. **A. Coulon, B. Nelain ve N. Vincent**, “Interest of equivalent damage methods for railway equipment qualification to vibrations,” *Porcedia Engineering*, cilt 133, pp. 714-725, 2015.
8. **P. Liu, S. Yang ve Y. Liu**, “Full-scale test and numerical simulation of wheelset-gear box vibration excited by wheel polygon wear and track irregularity,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, cilt 167, p. 108515, 2022.



İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Turbo Dizel Bir Havacılık Motorunun Enerji, Ekserji ve Ekserjiekonomik Performansının Değerlendirilmesi

Özgür Ballı¹

ÖZ

Bu çalışmada; enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analiz yöntemleri kullanılarak insansız hava araçları için kullanılan turbodizel bir havacılık motorunun performans doğrulanması yapılmıştır. Motorun enerji verimi %43.158, ekserji verimi ise %40.655 olarak bulunmuştur. Motorun yakıt enerjisi kayıp oranı %56.842 iken yakıt ekserji kayıp oranı %59.345 olarak hesaplanmıştır. Turbodizel motorun çevresel etki faktörü 1.460, ekolojik etki faktörü 2.460, ekolojik objektif fonksiyon değeri -227.173 MJ/h, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü ise 1.685 olarak elde edilmiştir. Turbodizel motorun ekonomik ve eksergo-ekonomik analiz sonuçlarına göre; güç üretimi için toplam maliyet akışı 47.035 \$/h ve üretilen gücün özgül ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan motorun yakıt maliyeti ile üretim maliyeti arasındaki bağıl maliyet artışı %248.655, sistemin eksergo-ekonomik faktörü %16.346 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, turbodizel havacılık motoru ile piston-prop havacılık motorunun performans kriterleri de karşılaştırılmıştır. Turbodizel motorun tüm performans parametrelerinin, piston-prop motorun parametrelerinden çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: IHA, turbodizel motoru, enerji, ekserji, eksergo-ekonomik

Energy, Exergy and Exergoeconomic Performance Assessments Of A Turbo Diesel Aviation Engine Used On Unmanned Air Vehicles

ABSTRACT

In this study, the performance of a turbodiesel aviation engine used in unmanned aerial vehicles was evaluated using energy, exergy, and exergoeconomic analyses methods. The engine's energy efficiency was 43.158%, while its exergy efficiency was 40.655%. When the engine's fuel energy loss rate was 56.842%, the fuel exergy loss rate was calculated to be 59.345%. The environmental impact factor, ecological impact factor, ecological objective function, exergetic sustainability index, and sustainable efficiency factor of a turbodiesel engine were calculated to be 1.460, 2.460, -227.173 MJ/h, 0.685, and 1.685, respectively. According to the results of the turbodiesel engine's economic and exergo-economic analyses, the total cost flow for power generation was calculated to be 47.035 \$/h, and the specific exergy cost of the generated power was calculated to be 0.095 \$/MJ. The relative cost increasing (relative cost difference) between the engine's fuel cost and the production cost was found to be 248.655% and the system's exergoeconomic factor was found to be 16.346%. Furthermore, the performance criteria of the turbodiesel aviation engine and the piston-prop aviation engine were compared in this study. The turbodiesel engine's performance parameters were determined to be significantly better than those of the piston-prop engine.

Keywords: UAV, turbodiesel engine, energy, exergy, exergoeconomic

Geliş/Received : 01.05.2022
Kabul/Accepted : 17.05.2022

¹ 1'inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü, Eskişehir
balli07balli@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-6465-8387



EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Objectives

UAVs (unmanned aerial vehicles) are widely employed in both military and civilian applications. However, because of the rapid increase in environmental impacts and fuel prices as a result of increased fossil fuel usage, UAV manufacturers have begun to adopt hybrid and electric motors as propulsion systems. Fuel consumption in UAVs can be lowered by using these propulsion technologies. On the other side, engine efficiency should be enhanced while cost generation and environmental impacts of engines are minimized for a cost-effective and ecologically friendly UAV propulsion system. To achieve these objectives, it is necessary to run the engine in the most efficient mode, pick high-quality fuel, reduce fuel consumption and loss and destruction rates, and minimize metrics such as the capital cost ratio. In this situation, energy, exergy, and exergoeconomic evaluations, as well as sustainability and environmental assessments, are critical for evaluating the performance of UAV engines and developing optimization models.

Methodology and Analysis

The turbodiesel aviation engine is first analyzed as a thermodynamic system in this study, and the control volume, inlet and outlet flows, balance equations, and dead state conditions of the system are determined as a result. Then, using thermodynamic principles, the thermodynamic system is represented. According to the study's scope, the energy and exergy equations are supplied. Following that, certain useful performance indicators about energy, exergy, environmental, sustainability, and exergoeconomic assessments are accounted for utilizing data from turbodiesel aviation engines. The performance parameters of a turbodiesel aircraft engine are compared to those of a piston-prop aviation engine, which was previously researched.

Results and Discussions

In this work, energy, exergy, and exergoeconomic analysis methodologies were utilized to evaluate the performance of a turbodiesel aviation engine used for unmanned aerial vehicles. The engine had 43.158% energy efficiency and 40.655% exergy efficiency. The fuel exergy waste flow was computed as 59.345% when the engine's fuel energy loss flow was 56.842%. The environmental impact factor, ecological impact factor, ecological objective function, exergetic sustainability index, and sustainable efficiency factor of turbodiesel engines are found to be 1.460, 2.460, -227.173 MJ/h, 0.685, and 1.685. According to the results of the turbodiesel engine's economic and exergoeconomic assessments, the overall cost flow for power generation is 47.035 \$/h, and the specific exergy cost of the generated power is 0.095 \$/MJ. The relative cost rise between the engine's fuel cost and the production cost, on the other hand, was found to be 248.655%, and the system's exergoeconomic factor was discovered to be 16.346%. Furthermore, the performance criteria of the turbodiesel aviation engine and the piston-prop aviation engine were examined in this study. The turbodiesel engine's performance metrics were all significantly superior than the piston-prop engine's.



1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA) gözetim, uzaktan ölçümlendirme, arama-kurtarma işlemlerini de kapsayacak şekilde hem askeri hem de sivil amaçlar için kullanılmaktadır [1-3]. Düşük idame-işletme-bakım maliyetinden ve kullanıcı personel için minimum risk oluşturduğundan dolayı İHA'ların askeri amaçlı kullanımı son yıllarda artmıştır [4]. Daha düşük maliyetli ve daha verimli İHA tasarımı; performansın, uçuş karakteristiklerinin ve taşıdığı yükün artırılmasıyla daha da önemli bir hale gelmiştir. Bu tip İHA'lar için son zamanlarda artan talep; çok farklı tiplerdeki İHA'ların geliştirilmesine neden olmuştur [5-8].

İHA'ların itki sistemleri teknolojisi, havacılığın en önemli gelişimlerinden biridir. İHA'ların itki sistemleri uçuş performansını ve süresini yüksek oranda etkilemektedir. Yapay zekâ ve mikroişlemci teknolojilerindeki hızlı gelişmeler İHA'ların karmaşık görevlerin yerine getirmesini kolaylaştırmış ve İHA'ların büyük ilgi görmesine neden olmuştur [9]. Kullanım kolaylığı, güvenliği, düşük maliyeti ve çevre dostu özelliklerine ilaveten tehlikeli, uzun menzilli ve uzun süreli askeri ve sivil görevleri başarı ile yerine getirdiğinden dolayı, İHA'ların son yıllarda pazar payı çok artmıştır [10-11]. Dünyanın her yerinde farklı görev gereksinimlerini karşılamak amacıyla farklı İHA teknolojilerinin geliştirilmesi de bu sektörün için büyük önem arz etmektedir [12].

İHA'ların itki sistemleri enerji kaynakları, motorlar ve güç ünitelerinden oluşur [13]. İtki sistemleri; elektrik, hibrit ve içten yanmalı motorlar (pistonlu, gaz türbinli ve ramjet) olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Konvansiyonel yakıt kullanan itki sistemleri kullanılan İHA'lar yüksek yük taşıma kapasitesi, uzun süreli dayanıklılık, uzun menzil ve hızlı yakıt ikmali avantajlarına sahiptir [14].

Küresel ölçekte fosil yakıt fiyatlarının artması ve fosil yakıt kullanımı konusunda çevresel farkındalık seviyesinin yükselmesi; genel olarak havacılık sektörünün, özel olarak ise motor üreticilerinin yakıt sarfiyatını azaltmaları ve karbon ayak izini düşürmeleri konusunda çalışmalar yapmalarını zorunlu kılmaktadır [15]. Bu kapsamda; İHA üreticilerini hibrit ve elektrik motorlarından oluşan itki sistemleri geliştirmeye ve kullanmaya yönlendirmiştir. Bu itki sistemlerin kullanılmasıyla birlikte İHA'larda %30 oranında yakıt tüketimi düşürülmüştür [16]. İHA'larda kullanılan itki sistemleriyle ilgili yapılan tüm çalışmalar Zhang ve diğerleri [17] tarafından yapılan çalışmada özetlenmiştir.

Bu çalışmada, enerji, ekserji, ve ekserjiekonomik analiz yöntemleriyle İHA'larda kullanılan bir turbodizel havacılık motorunun performans doğrulaması yapılmıştır.

2. MATERYAL

Bu çalışmada insansız hava araçlarında kullanılan 170 beygir shaft gücü (HP) ile 2x4.5 kilovat (kW) elektriksel güç üreten bir turbodizel havacılık motoru incelenecek olup,

Tablo 1. Turbodizel Havacılık Motoru Bilgileri [18]

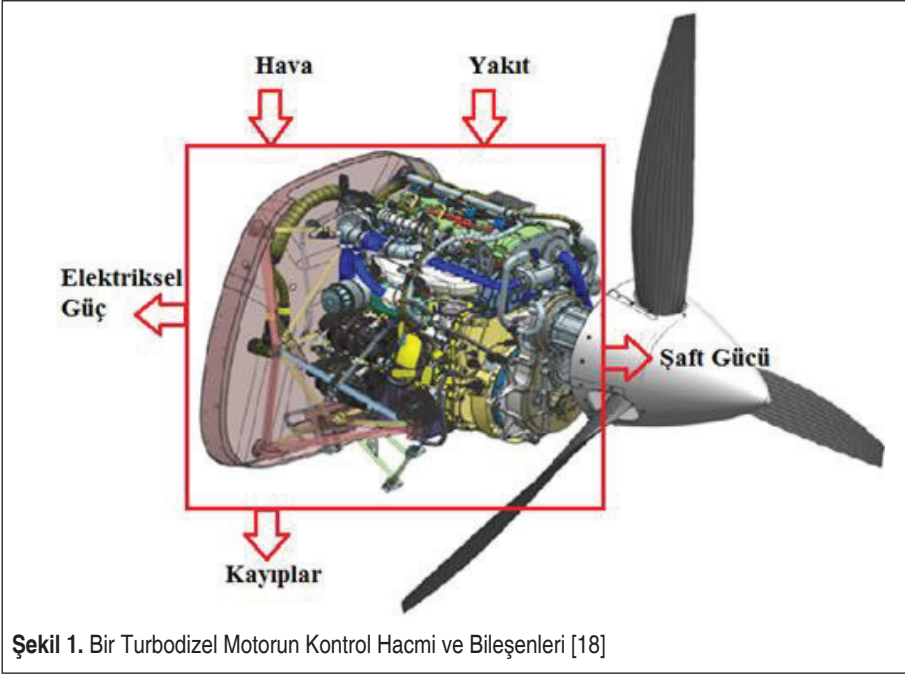
Açıklama	Bilgi/Değer
Motor konfigürasyonu	Sıralı 4 silindir
Silindir hacmi	2.1 litre
Hava besleme	İki kademe seri turboşarj
Kalkış gücü	172 (+2) HP veya 128.26 kW (1.49+- kW)
Sürekli güç @2300 propeller RPM	172 (+2) HP
İrtifa gücü @ 20000 ft (6096 metre)	170 HP veya 128.26 kW
İrtifa gücü @ 30000 ft (9144 metre)	130 HP veya 96.94 kW
Özgül yakıt tüketimi (BSFC@MSL-deniz seviyesi)	207 g/kWh (+3)
Yakıt	JP-8 veya Jet-A1 jet yakıtı
Motor kuru ağırlığı	162 kg
Motor kontrolü	Yedekli motor kontrol sistemi (MKS)
Takıldığı uçak konfigürasyonu	İtici ve çekici
Pervane kontrolü	MKS kontrollü hidromekanik governor
Elektriksel güç üretimi	2x4.5 kW
MKS yazılımı ve alternatör kontrolü	DO-178C DAL-C sertifikaya edilebilir

turbodizel motora ait teknik bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur [18]. Motorun satış fiyatı 50000 \$ olup motorun revizyon bakım aralığı 3600 saat (h)’tir [19].

3. YÖNTEM VE ANALİZ

Bu çalışmada, insansız hava araçlarında kullanılan turbodizel motor termodinamik bir sistem olarak ele alınmış olup, kontrol hacmi Şekil 1’de gösterilmiştir. Kontrol hacminde de gösterildiği üzere; motora hava ve yakıt girerken, motor pervaneyi döndürmek için shaft gücü ve elektriksel ihtiyaçları karşılamak için elektriksel güç üretmektedir. Motordan atılan egzoz gazları ve yüzeyden çevreye olan ısı transferi ile enerji kayıpları meydana gelmektedir.

Termodinamik bilimi çerçevesinde motor sürekli akışlı-sürekli açık (SASA) bir sistem olarak ele alınmıştır. Kontrol hacmine (motora) giren toplam kütle akışı, kontrol hacminden çıkan toplam kütle akışına eşit olup, kontrol hacmindeki toplam kütle sabit olup zamanla değişmemektedir. Bu çalışma için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:



- Çevre sıcaklığı 298.15 Kelvin (K) ve çevre basıncı 101.325 kPa'dır.
- Jet yakıtının alt ısıl değeri 43124 kJ/kg olup, basit kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ 'dür.
- Tüm incelemeler motorun maksimum kalkış çalışma koşulları değerlerine göre yapılmıştır.
- Motor yıllık uçuş saati 900 saattir.
- Motorun servis ömrü 20 yıldır.
- Motorun yıllık idame-işletme-bakım maliyeti, motor satış fiyatının %10'u kadar olup, motor hurdaya ayrılacağındaki hurda değeri motor satış fiyatının %15'i kadardır.
- Yıllık faiz %14 alınmıştır.
- Jet A-1 yakıtının satış fiyatı 1.245 \$/kg (1245 \$/metrik ton)'dır [20].

3.1 Enerji analizi

Termodinamiğin enerji korunumu kanuna göre; motora giren yakıt enerjisi motordan çıkan toplam enerji miktarına eşittir. Motordan çıkan toplam enerji; yararlı motor işinden (şaft gücü ve elektriksel güç) ve enerji kayıplarından (egzoz gazları ile atılan enerji ve yüzeyden ısı ile atılan enerji) oluşur. Bu tanıma uygun bir şekilde;

Yakıt (F)-Ürün(Pr) yaklaşımına göre enerji korunumu denklemi [21-24]:



$$\dot{E}_F = \dot{E}_{Pr} + \dot{E}_{WE} \quad (1)$$

$$\dot{E}_F = \dot{m}_F LHV \quad (2)$$

$$\dot{E}_{Pr} = \dot{W}_{saft} + \dot{W}_{el} \quad (3)$$

Bu denklemlerdeki \dot{E}_F , \dot{m}_F , LHV , \dot{E}_{Pr} , \dot{E}_{WE} , \dot{W}_{saft} ve \dot{W}_{el} ; yakıt enerji akışı, yakıt tüketimi, yakıtın alt ısıl değeri, ürün enerji akışı, enerji kaybı, şaft gücü ve elektriksel gücü ifade etmektedir.

Motorun enerji performansı aşağıdaki verilen performans parametrelerinden tespit edilmektedir [21-24].

Motorun enerji verimi;

$$\eta_{en} = \frac{\dot{E}_{Pr}}{\dot{E}_F} \quad (4)$$

Yakıt enerjisi kayıp oranı:

$$FELR = \frac{\dot{E}_{WE}}{\dot{E}_F} \quad (5)$$

Üretim enerjisi kayıp oranı:

$$PELR = \frac{\dot{E}_{WE}}{\dot{E}_{Pr}} \quad (6)$$

Bu denklemlerdeki η_{en} , $FELR$, ve $PELR$; enerji verimi, yakıt enerjisi kayıp oranı ve üretim enerjisi kayıp oranıdır.

3.2 Ekserji Analizi

Belirli çevre koşulları altında bir sistemin yapabileceği maksimum yararlı işe, o sistemin ekserji denir. Bir sistem için enerji korunurken, ekserji sistem içerisindeki entropi üretiminden ve çevreye olan kayıplardan dolayı korunamaz. Yakıt (F)-ürün(Pr) yaklaşımına göre bir sistem için ekserji denge denklemi [21-24]:

$$\dot{E}x_F = \dot{E}x_{Pr} + \dot{E}x_{WE} \quad (7)$$

$$\dot{E}x_F = \dot{m}_F \varepsilon_F = \dot{m}_F LHV \phi \quad (8)$$

$$\dot{E}x_{Pr} = \dot{W}_{saft} + \dot{W}_{el} \quad (9)$$

Bu denklemlerdeki $\dot{E}x_F$, \dot{m}_F , ε_F , LHV , ϕ , $\dot{E}x_{Pr}$, $\dot{E}x_{WE}$, \dot{W}_{saft} ve \dot{W}_{el} ; yakıt ekserji



akışı, yakıt tüketimi, özgül yakıt ekserjisi, yakıtın alt ısıl değeri, yakıt ekserjisi kalite indeksi, ürün ekserji akışı, toplam ekserji kaybı (yıkımlar ve kayıplar) akışı, shaft gücü ve elektriksel gücü ifade etmektedir. Yakıtın ekserji kalite indeksi (ϕ) aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir [21, 22, 25]:

$$\phi = 1.4224 + 0.011925 \frac{b}{a} - \frac{0.042}{a} \quad (10)$$

Jet yakıtı ($C_{12}H_{23}$) için ϕ ; denklem (10)'dan 1.0616 olarak hesaplanmıştır.

Motorun ekserji performansı, aşağıdaki verilen performans parametreleriyle belirlenmektedir [21-24].

Motorun ekserji verimi;

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{xPr}}{\dot{E}_{x_F}} \quad (11)$$

Yakıt ekserjisi kayıp oranı:

$$FExLR = \frac{\dot{E}_{x_{WE}}}{\dot{E}_{x_F}} \quad (12)$$

Üretim ekserjisi kayıp oranı:

$$PExLR = \frac{\dot{E}_{x_{WE}}}{\dot{E}_{x_{Pr}}} \quad (13)$$

Bu denklemlerdeki η_{ex} , $FExLR$, ve $PExLR$; ekserji verimi, yakıt ekserjisi kayıp oranı, üretim ekserjisi kayıp oranını ifade etmektedir. Motorun verimini arttırmak için her aşamada (tasarım ve üretim aşaması, kullanım aşaması vb.) yakıt tüketimini düşürmek, motor gücünü arttırmak veya verimi arttırmak için iyileştirmeler yapılabilir. Motor için teorik olarak ekserjetik iyileştirme potansiyeli:

$$ExIP = (1 - \eta_{ex})\dot{E}_{x_{WE}} \quad (14)$$

Teorik ekserji iyileştirme potansiyelinden sonra motorun iyileştirilmiş ekserji verimi ise:

$$\eta_{eximp} = \frac{\dot{E}_{x_{Pr}}}{\dot{E}_{x_F} - ExIP} \quad (15)$$

denklemlerinden bulunabilir. Bu denklemlerde verilen $ExIP$ ve η_{eximp} ; ekserjetik iyileştirme potansiyelini ve iyileştirilmiş ekserji verimini ifade etmektedir.

Ekserji analizi kapsamında motorun çevresel etki analizi ve sürdürülebilirlik değerlendirilmesi de yapılabilir. Bu kapsamda [26-32];

Çevresel etki faktörü (*EEF*):

$$EEF = \frac{FExLR}{\eta_{ex}} \quad (16)$$

Ekolojik etki faktörü (*EcoEF*):

$$EcoEF = \frac{\dot{E}x_F}{\dot{E}x_{Pr}} = \frac{1}{\eta_{ex}} \quad (17)$$

Ekolojik objektif fonksiyonu (*EOF*):

$$EOF = \dot{E}x_{Pr} - \dot{E}x_{WE} \quad (18)$$

Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (*ExSI*):

$$ExSI = \frac{1}{EEF} \quad (19)$$

Sürdürülebilir verimlilik faktörü (*SEF*):

$$SEF_k = \frac{1}{1 - \eta_{ex}} \quad (20)$$

denklemlerinden hesaplanır.

3.3 Ekserjiekonomik Analiz

Eksergo-ekonomik analiz ekonomik ve ekserji analizinin birleşiminden oluşmakta olup; motorun ürettiği yararlı ürünün (şaft gücü ve elektriksel güç), motorun tükettiği yakıtın ve yararlı ürüne dönüştürülemeyen yakıt ekserjisi maliyet akışlarının hesaplanmasına katkı sağlamaktadır. Bir sistem için eksergo-ekonomik analiz yapılmadan önce; incelenen sistemin ekonomik değerlerinin (sistem yatırım maliyeti, hurda değeri, sistemin şimdiki değeri, yıllık maliyet akışı, saatlik maliyet akışı, sistemin idame-işletme-bakım maliyeti, yatık tüketim maliyeti vb.) hesaplanmasına ihtiyaç vardır. Ekonomik veriler aşağıdaki bağlantılardan hesaplanmaktadır [21, 26, 33-34].

Motorun satın alma maliyeti (*PEC*), hurda değeri (*SV*) ve şimdiki değer faktörü (*PVF*) biliniyor ise motorun şimdiki değeri (*PW*):

$$PW = PEC - SV * PVF(i, n) \quad (21)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu denklemdeki şimdiki değer faktörü (*PVF*); yıllık faizin (*i*) ve sistem ömür süresinin (*n*) fonksiyonudur ve:

$$PVF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (22)$$

denkleminde bulunur.

Motorun hurda değeri (SV); motorun alım fiyatı (PEC) ve hurda değer yüzdesinin (π) fonksiyonu olup;

$$SV = PEC * \pi \quad (23)$$

bağıntısından tespit edilir.

Sermayenin geri kazanım faktörü (CRF) yıllık faizin (i) ve sistem ömür süresinin (n) fonksiyonu olup;

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (24)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Yıllık sermaye maliyet akışı ($A\dot{C}C$), sistemin şimdiki değerine ve sermayenin geri kazanım faktörüne (CRF) bağlıdır. Yıllık sermaye maliyet akışı ($A\dot{C}C$):

$$A\dot{C}C = PW * CRF(i, n) \quad (25)$$

denkleminde elde edilir. Bu durumda motorun yıllık çalışma süresi (τ) belli ise:

Saatlik ana para yatırım maliyeti (\dot{Z}^{CI}):

$$\dot{Z}^{CI} = \frac{A\dot{C}C}{\tau} \quad (26)$$

Saatlik idame-işletme-bakım maliyeti (\dot{Z}^{OM}):

$$\dot{Z}^{OM} = \frac{OMC}{\tau} \quad (27)$$

Sistemin saatlik toplam maliyeti (\dot{Z}^{TC})

$$\dot{Z}^{TC} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (28)$$

denklemlerinden hesaplanmaktadır. Motorun saatlik yakıt tüketimi (\dot{m}_F) ve yakıt satış fiyatı (FSP) belliyse saatlik yakıt maliyeti (\dot{C}_F):

$$\dot{C}_F = \dot{m}_F FSP \quad (29)$$

bağıntısından bulunur.

Bu çalışma için özgül ekserji maliyeti (specific exergy costing-SPECO) olarak tanımlanan eksergo-ekonomik analiz yöntemi seçilmiştir. Motor için eksergo-ekonomik denge denklemi;

$$\dot{C}_F + \dot{Z}^{TC} = \dot{C}_{Pr} \quad (30)$$

şeklinde yazılabilir ve denklemdeki \dot{C}_F saatlik yakıt maliyetini, \dot{C}_{Pr} saatlik üretim maliyetini, \dot{Z}^{TC} ise sistemin toplam saatlik yatırım ve idame-işletme-bakım maliyetini ifade etmektedir. Yakıt ve üretilen ürünün özgül ekserji maliyetleri sırasıyla:

$$\frac{\dot{C}_F}{Ex_F} = c_F \quad (31)$$

$$\frac{\dot{C}_{Pr}}{Ex_{Pr}} = c_{Pr} \quad (32)$$

bağıntılarından hesaplanmaktadır.

Bir sistemin eksergo-ekonomik değerlendirmesi için izafi maliyet farkı, ekserjiekonomik faktör ve ekserji kaybının maliyet akışı gibi performans parametreleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda;

Bağıl maliyet farkı (r):

$$r = \frac{c_{Pr} - c_F}{c_F} \quad (33)$$

Eksergo-ekonomik faktör (f):

$$f = \frac{\dot{Z}^{TC}}{\dot{Z}^{TC} + \dot{C}_{WE}} \quad (34)$$

Ekserji kaybının maliyet akışı (\dot{C}_{WE}):

$$\dot{C}_{WE} = c_F \dot{Ex}_{WE} = c_F (\dot{Ex}_D + \dot{Ex}_L) \quad (35)$$

denklemlerinden hesaplanır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1 Enerji Analizi Sonuçları

Turbodizel havacılık motoru deniz seviyesinde maksimum çalışma şartlarında 26.550 kg/h'lik JP-8 jet yakıtı tüketirken 461.745 MJ/h'lik motor shaft gücü ve 32.400 MJ/h'lik elektriksel güç üretmektedir. Motorun ürettiği toplam güç 494.145 MJ/h'tir. Motorun bu gücü üretebilmesi için toplamda 1144.957 MJ/h'lik yakıt enerjisi kullanılmaktadır. Bu şartlar altında motorun enerji verimi %43.158, yakıt enerjisi kayıp oranı %56.842 ve üretim enerjisi kayıp oranı %131.705 olarak hesaplanmıştır.

4.2 Ekserji Analizi Sonuçları

Yakıt ekserjisi kalite indeksi 1.0616 olduğundan dolayı JP-8 yakıtının alt ısı değerleri

**Tablo 2.** Turbodizel Havacılık Motorunun Ekserjetik Performans Parametreleri

Parametre	Birimi	Değeri
Ekserji verimi (η_{ex})	(%)	40.655
Yakıt ekserjisi kayıp oranı ($FExLR$)	(%)	59.345
Üretim ekserjisi kayıp oranı ($PExLR$)	(%)	145.973
Ekserjetik iyileştirme potansiyeli ($ExIP$)	(MJ/h)	428.067
İyileştirilmiş ekserji verimi ($\eta_{ex,imp}$)	(%)	62.757
Çevresel etki faktörü (EEF)	(-)	1.460
Ekolojik etki faktörü ($EcoEF$)	(-)	2.460
Ekolojik objektif fonksiyonu (EOF)	(MJ/h)	-227.173
Ekolojik objektif fonksiyon indeksi ($EOFI$)	(-)	-0.460
Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ($ExSI$)	(-)	0.685
Sürdürülebilir verimlilik faktörü (SEF)	(-)	1.685

43124 kJ/kg olmasına rağmen JP-8 yakıtının özgül ekserjisi 45779.587 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Bu durumda motor tarafından tüketilen 26.550 kg/h'lik jet yakıtının ekserji değeri 1215.463 MJ/h olarak hesaplanmıştır Mekanik, kinetik ve elektrik enerjisinin tamamı işe dönüştürülebildiğinden dolayı, bu enerji türlerinin enerji ve ekserji değerleri birbirine eşittir. Bu durumda motorun üretmiş olduğu toplam gücün ekserjisi 494.145 MJ/h'dir. Motorda meydana gelen toplam ekserji kaybı ise 721.318 MJ/h olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak hesaplanan ekserji performans parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'de verilen değerler göz önüne alındığında;

- Motorun ekserji verimi %40.655 ve yakıt ekserjisi kayıp oranı %59.345 olarak hesaplanmıştır. Başka bir anlatım ile motora giren toplam yakıt ekserjisinin %59.345'i yararlı işe dönüştürülememektedir.
- Motorun üretim ekserjisi kayıp oranı %145.973 bulunmuştur. Bu değer; motorun ürettiği yararlı işin yaklaşık 1.5 katı kadar yakıt ekserjisi kaybı meydana geldiğini göstermektedir.
- Motor üzerinde gerekli iyileştirmeler ve tadilatlar yapılırsa; 721.318 MJ/h'lik ekserji kaybının 428.067 MJ/h'lik kısmı teorik olarak geri kazanılabilecektir. Bu durumda iyileştirilmiş motorun ekserji verimi %62.757'ye kadar çıkabilecektir.

Bir sistemin enerji ve/veya ekserji verimi ne kadar düşük ise; birim iş üretimi için



harcanan yakıt tüketimi o miktarda yüksek olur. Bu durum istenen işi üretmek için daha fazla yakıt tüketimine neden olur. Artan yakıt tüketimine bağlı olarak daha fazla yanma emisyonu üretilecek olup, daha fazla çevresel etki ve kirlenme meydana gelecektir. Bu bakış açısıyla ekserji terimleriyle motorun çevresel ve ekolojik etki değerlendirilmeleri ve sürdürülebilirlik seviyesi belirlenmesi yapılabilmektedir. Bu değerler genellikle boyutsuz olup, benzer sistemlerin kıyaslanmasında kullanılmaktadır. Tablo 2’de verilen değerler göz önüne alındığında; turbodizel havacılık motorunun çevresel etki faktörü 1.460 iken ekolojik etki faktörü 2.460 olarak hesaplanmıştır. Motorun ekolojik objektif fonksiyon değeri -227.173 MJ/h olarak bulunmuştur. Bulunan değerlerin negatif olması; motorda meydana gelen ekserji kaybının motorun üretim ekserjisinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Motorun ekolojik objektif fonksiyon indeksi ise -0.460 olarak hesaplanmıştır.

Motorun sürdürülebilirlik seviyesinin belirlenmesinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve sürdürülebilir verimlilik faktörü değerlerine bakılır. İncelenen motor için sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü ise 1.685 olarak bulunmuştur.

4.3 Ekserjiekonomik Analiz Sonuçları

Ekserjiekonomik analizden önce motorun ekonomik verileri ve saatlik maliyet oluşumları hesaplanmıştır. Motorun satış fiyatı 50000 \$’dır. Motorun yıllık idame-işletme-bakım maliyeti; motorun satış fiyatının %10’u olarak kabul edilmiş olup, yıllık 5000 \$’dır. Motor 3600 saatte (h) bir revizyona (ağır bakım ve yenileme) alınmakta-

Tablo 3. Turbodizel Havacılık Motoruna Ait Hesaplanan Ekonomik Veriler

Parametre	Birimi	Değer
Motor satış fiyatı (PEC)	(\$)	50000
Motorun yıllık idame-işletme-bakım maliyeti (OMC)	(\$/yıl)	5000
Motorun yıllık çalışma saati (τ)	(h)	900
Yıllık faiz oranı (i)	(%)	14
Motor servis ömrü (n)	(yıl)	20
Hurda değer oranı (π)	(%)	15
Şimdiki değer faktörü (PVF)	(-)	0.073
Sermaye geri-dönüş faktörü (CRF)	(-)	0.151
Motorun şimdiki değeri (PW)	(\$)	49454.287
Yıllık sermaye akış maliyeti (ACC)	(\$/yıl)	7466.905
Saatlik idame-işletme-bakım maliyeti (\dot{Z}^{OM})	(\$/h)	5.556
Saatlik sermaye akış maliyeti (\dot{Z}^{CI})	(\$/h)	8.297
Saatlik toplam sistem kaynaklı maliyet akışı (\dot{Z}^{TC})	(\$/h)	13.852



dır. Motorun yıllık 900 saat uçtuğundan dolayı her 4 yılda bir revizyon edilmektedir. Bu durumda 4 yıllık revizyon maliyeti $4 \times 5000 \$ = 20000 \$$ 'dır. Motorun hurdaya ayrılmasına kadar geçen süreye servis ömrü denir ve incelenen motor için 20 yıl kabul edilmiştir. Motorun hurdaya ayrıldığındaki "motor hurda değeri" motor satış fiyatının %15'i kadardır. Bu çalışmada yıllık faiz %14 olarak ele alınmıştır. Bu veriler ışığında motora ait ekonomik veriler hesaplanmış ve Tablo 3'de verilmiştir.

JP-8 yakıtının 1 metrik tonu 1249.8 \$ olduğundan yakıtın birim satış fiyatı 1.249 \$/kg olmaktadır. Bu durumda 26.550 kg/h'lik yakıt tüketimi için toplam yakıt maliyeti 33.183 \$/h olarak hesaplanmıştır. Motorun tükettiği yakıtın ekserji değeri 1215.463 MJ/h'dir. Yakıt maliyet ve ekserji akışı bilindiğinden motorun tükettiği yakıtın özgül ekserji maliyeti 0.027 \$/MJ olarak hesaplanmıştır.

Sermayeden ve idame-işletme-bakımdan kaynaklanan (sistem kaynaklı) saatlik maliyet akışı 13.852 \$/h olarak bulunmuştur. Motorun güç üretimi için toplam maliyet akışı; yakıt maliyet ve sistem kaynaklı maliyetlerin toplamından oluşur. 33.183 \$/h'lik kısmı yakıt maliyeti ve 13.852 h'lik kısmı sistem kaynaklı maliyet akışı olmak üzere motorun şaft ve elektrik üretimini gerçekleştirebilmesi için harcanan toplam maliyet akışı 47.035 \$/h'dir. Motorun ürettiği 494.145 MJ/h'lik toplam motor gücü ekserjisinin özgül ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak hesaplanmıştır.

4.3 Kıyaslama

170 HP şaft gücü+9 kW elektriksel güç üreten turbodizel bir havacılık motoru ile havacılık benzini (AVGAS) yakan 180 HP'lık piston-prop motorun enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları ve ikisinin değerleri arasındaki yüzdesel farklar Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'deki bilgilere göre, piston-prop motoruna göre incelenen turbodizel havacılık motoru;

- % 4.48 daha az güç üretmesine rağmen %40.36 daha az yakıt tüketmektedir.
- % 54.58 daha az enerji kaybına sahiptir.
- % 66.89 daha fazla enerji verimine sahiptir
- % 92.40 daha az yakıt enerjisi kayıp oranı sahiptir.
- % 59.15 daha düşük üretim enerjisi kayıp oranına sahiptir.
- % 40.47 oranında daha az yakıt ekserjisi tüketmektedir.
- % 66.89 oranında daha fazla ekserji verimine sahiptir.
- % 22.25 oranında daha az yakıt ekserjisi kayıp oranına sahiptir.
- Üretim ekserjisi kayıp oranı % 54.72 oranında daha azdır.
- Çevresel etki faktörü % 54.71 oranında daha azdır.
- Ekolojik etki faktörü % 41.76 oranında daha azdır.
- Ekolojik objektif fonksiyon değeri % 78.87 oranında daha azdır.



- Ekolojik objektif fonksiyon indeksi % 79.32 oranında daha azdır.
- Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi % 120.97 oranında daha iyidir.
- Sürdürülebilir verimlilik faktörü % 28.63 oranında daha iyidir.
- Saatlik yakıt tüketim maliyeti % 73.24 oranında daha azdır.
- Sistem kaynaklı saatlik maliyet akışı % 99.97 oranında daha düşüktür.
- Üretim maliyet akışı % 73.70 oranında daha düşüktür.

Tablo 4. Turbodizel ve AVGAS Yakıtlı Piston-Prop Motorlarının Verileri ve Kıyaslaması

Parametre	Birim	Turbodizel motor (170 HP+9 kW)	Avgas piston-prop motor (180 HP) [20]	Fark (%)
\dot{W}	(MJ/h)	461.745	483.408	-4.48
\dot{E}_F	(MJ/h)	1144.957	1919.376	-40.36
\dot{E}_L	(MJ/h)	650.812	1435.968	-54.68
η_{en}	(%)	43.158	25.186	66.89
$FELR$	(%)	56.842	74.814	-92.40
$PELR$	(%)	131.705	322.385	-59.15
\dot{E}_{xF}		1215.463	2041.842	-40.47
η_{ex}	(%)	40.655	23.675	71.72
$FExLR$	(%)	59.345	76.325	-22.25
$PExLR$	(%)	145.973	322.385	-54.72
EEF	(-)	1.460	3.224	-54.71
EcoEF	(-)	2.460	4.224	-41.76
EOF	(MJ/h)	-227.173	-1075.026	-78.87
EOFI	(-)	-0.460	-2.224	-79.32
ExSI	(-)	0.685	0.310	120.97
SEF	(-)	1.685	1.310	28.63
\dot{C}_F	(\$/h)	33.183	123.984	-73.24
Z	(\$/h)	13.852	51.961	-99.97
\dot{C}_{Pr}	(\$/h)	47.035	175.945	-73.27
c_F	(\$/MJ)	0.027	0.061	-55.74
c_{Pr}	(\$/MJ)	0.095	0.364	-73.90
\dot{C}_{Wex}	(\$/h)	70.892	94.631	-25.09
r	(%)	248.655	499.404	-50.21
f	(%)	16.346	35.446	-53.88



- Özgül yakıt ekserji maliyeti % 55.74 oranında daha azdır.
- Özgül ürün ekserji maliyeti % 73.90 oranında daha düşüktür.
- Ekserji kaybı maliyeti % 25.09 oranında daha azdır.
- Bağlı maliyet farkı % 50.21 oranında daha düşüktür.
- Eksergo-ekonomik faktör değeri % 53.88 daha azdır. Bunun nedeni, turbodizel havacılık motorunun saatlik sistem temelli toplam maliyet akışının piston-prop motorununkinden % 99.97 oranında daha az olmasıdır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada insansız hava araçlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve üretilen bir turbodizel havacılık motoru incelenmiştir. Motor toplam 170 HP shaft gücü ve $2 \times 4.5 \text{ kW} = 9 \text{ kW}$ elektriksel güç üretmektedir. Söz konusu motorun enerji, ekserji, ekserji temelinde çevresel etki ve sürdürülebilirlik, eksergo-ekonomik analizleri detaylı bir şekilde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar; shaft gücü üretimi 180 HP olan ve AVGAS (havacılık benzini) tüketen içten yanmalı piston-prop motorunun performans sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre turbodizel havacılık motorunun;

- Enerji verimi % 43.158 ve ekserji verimi % 40.655 olarak bulunmuştur.
- Çevresel etki faktörü 1.460 ve ekolojik etki faktörü 2.460 olarak hesaplanmıştır.
- Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü 1.685 olarak elde edilmiştir.
- Özgül yakıt ekserji maliyeti 0.027 \$/MJ ve özgül motor üretim ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak bulunmuştur.
- Tablo 4’de de gösterildiği üzere diğer tüm performans değerlendirme kriterlerinin de piston-prop havacılık motorundan daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmanın devamı olarak, turbodizel havacılık motorunun ekserji temelli çevre analizi ve yaşam döngüsü doğrulaması (LCA: life cycle assessment) analizleri yapılacaktır.

KISALTMALAR VE SEMBOLLER

ACC	Yıllık anapara akışı	(\$/yıl)
C_F	Saatlik yakıt veya girenlerin maliyet akışı	(\$/h)
c_F	Özgül yakıt ekserji maliyeti	(\$/MJ)
C_{Pr}	Saatlik üretim/ürünlerin maliyet akışı	(\$/h)
cPr	Özgül ürün ekserji maliyeti	(\$/MJ)
C_{WE}	Saatlik ekserji kaybı maliyet akışı	(\$/h)



CRF	Anapara geri kazanım faktörü	(-)
EcoEF	Ekoloji etki faktörü	(-)
EEF	Çevresel etki faktörü	(-)
\dot{E}_F	Yakıt enerji akışı	(MJ/h)
\dot{E}_{Pr}	Ürün enerji akışı	(MJ/h)
EOF	Ekolojik objektif fonksiyonu	(MJ/h)
\dot{E}_{WE}	Kayıp enerji akışı	(MJ/h)
\dot{E}_{xF}	Yakıt ekserji akışı	(MJ/h)
$ExIP$	Ekserji iyileştirme potansiyeli	(MJ/h)
\dot{E}_{xPr}	Ürün ekserji akışı	(MJ/h)
ExSI	Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	(-)
$ExWE$	Kayıp ekserji akışı	(MJ/h)
f	Eksergo-ekonomik faktör	(%)
FELR	Yakıt enerjisi kayıp oranı	(%)
FExLR	Yakıt ekserjisi kayıp oranı	(%)
i	Yıllık faiz	(%)
FSP	Yakıt satış fiyatı	(\$/kg)
LHV	Yakıt alt ısı değer	(kJ/kg)
\dot{m}_F	Yakıt tüketimi	(kg/h)
n	Sistemin ömrü	(yıl)
OMC	Yıllık idame-işletme maliyet akışı	(\$/yıl)
PEC	Sistem alış maliyeti	(\$)
PELR	Ürün enerjisi kayıp oranı	(%)
PExLR	Ürün ekserjisi kayıp oranı	(%)
PVF	Şimdiki değer faktörü	
PW	Şimdiki değer maliyeti	(\$)
r	Bağıl maliyet farkı	(%)
SEF	Sürdürülebilir verimlilik faktörü	(-)
SPECO	Özgül ekserji maliyeti	(-)
SV	Hurda değeri	(\$)
\dot{Z}^{CI}	Saatlik anapara yatırım maliyeti	(\$/h)
\dot{Z}^{OM}	Saatlik idame-işletme maliyet akışı	(\$/h)
\dot{Z}^{TC}	Saatlik toplam maliyet akışı	(\$/h)



\dot{W}_{el}	Elektrik gücü	(MJ/h)
W_{saft}	Şaft gücü	(MJ/h)
η_{en}	Enerji verimi	(%)
η_{ex}	Ekserji verimi	(%)
η_{eximp}	İyileştirilmiş ekserji verimi	(%)
ϵ_F	Özgül yakıt ekserjisi	(kJ/kg)
ϕ	Yakıt ekserjisi kalite indeksi	(-)
π	Hurda değer yüzdesi	(%)
τ	Sistemin yıllık çalışma süresi	(h)

KAYNAKÇA

1. **Newcome LR.** Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Air Vehicles, Reston: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
2. **Prior D, Shen ST, White AS, Odedra S, Karamanoglu M., Erbil MA, Foran T.** Development of a Novel Platform for Greater Situational Awareness in the Urban Military Terrain, Proc. 8th International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, San Diego, USA, 2009, pp. 120-125.
3. **Astrov I, Pedai A.** Control of Hovering Manoeuvres in Unmanned Helicopter for Enhanced Situational Awareness, Proc. International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Chengdu, China, 2009, pp. 143-146.X1.
4. **Colomina I, Molina P.** Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014 . 92: 79–97.
5. **Yali Y, Feng S, Yuanxi W.** Controller Design of Quadrotor Aerial Robot, Physics Procedia. 2012; 33: 1254 – 1260.
6. **Hoffmann GM, Huang H., Waslander SL., Tomlin CJ.** Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed, Control Engineering Practice, 2011; 19(9): 1023– 1036.
7. **Romero H., Salazar S, Lozano R.** Real Time Stabilization of an Eight-Rotor UAV Using Optical Flow, IEEE Transactions on Robotics, 2009; 25(4):809-817.
8. **Bošnjak M, Matko D, Blažič S.** Quadcopter control using an on-board video system with off-board processing, Robotics and Autonomous System, 2012; 60: 657-667.
9. **Aasen H, Honkavaara E, Lucieer A, Zarco-Tejada PJ.** Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. Remote. Sensing. 2018, 10, 1091.
10. **Abdullah M, Faizan M, Bhatti MY, Hasham HJ.** System design and analysis of hand lunched UAV. In Proceedings of the 14th International Bhurban Conference on Appli-



ed Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 10–14 January 2017; pp. 551–560. *Energies* 2022, 15, 455 22 of 25

11. **Adamo F, Andria G, Di-Nisio A, Carducci CGC, Lanzolla AM, Mattencini G.** Development and characterization of a measurement instrumentation system for UAV components testing. In Proceedings of the IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, Padua, Italy, 21–23 June 2017; pp. 355–359.
12. **Gao X, Liu C, Huang Y, Son Z.** Design of an UAV-oriented wireless power transfer system with energy-efficient receiver. In Proceedings of the IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 18–21 October 2020; pp. 2025–2030.
13. **Liu C, Yu J, Lee CH.** A new electric magnetic-g geared machine for electric unmanned aerial vehicles. *IEEE Trans. Magn.* 2017, 53:1-6.
14. **Kong X, Liu H.** Research progress of key technologies of aviation piston engine for UAV. *Small Intern. Combust. Engine Veh. Tech.* 2021, 50: 3.
15. **Saraçyakupoğlu T, Delibaş H D, Özçelik A D.** Bir İnsansız Hava Aracının İtki ve Manevra Hareketlerinde Gövde İçi Basınçlı Hava Kullanımı. *EJOSAT.* 2021; (24): 81-86.
16. **Kong X, Zhang Z, Lu J, Li J, Yu L.** Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* 2018, 39: 021651.
17. **Zhang B, Song Z, Zhao F, Liu C.** Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies* 2022, 15: 455. <https://doi.org/10.3390/en15020455>
18. TEI-PD170 Turbodizel havacılık motoru. www.tei.com.tr/tr/urunler/tei-pd170-turbodizel-havacilik-motoru Giriş Tarihi: 28 Nisan 2022
19. **Sünnetçi İbrahim.** TEI-PD170 Turbodizel havacılık motoru seri üretim teslim töreni (15 Ocak 2020). www.defenceturkey.com/tr/icerik/tei-pd170-turbodizel-havacilik-motoru-seri-uretim-teslim-toreni-3808 Giriş tarihi: 28 Nisan 2022
20. <https://jet-a1-fuel.com/price/turkey> . Giriş tarihi: 28 Nisan 2022-05-01
21. **Balli O.** Thermodynamic, thermoenvironmental and thermoeconomic analyses of piston-prop engines (PPEs) for landing and take-off (LTO) flight phases *Energy.* 2022; 250: 123725
22. **Akdeniz HY.** Landing and take-off (LTO) flight phase performances of various piston-prop aviation engines in terms of energy, exergy, irreversibility, aviation, sustainability and environmental viewpoints. *Energy* 2022;243:123179
23. **Balli O, Caliskan H.** Turbofan engine performances from aviation, thermodynamic and environmental perspectives. *Energy* 2021;232:121031.
24. **Balli O, Caliskan H.** On-design and off-design operation performance assessments of an aero turboprop engine used on unmanned aerial vehicles (UAVs) in terms of aviation, thermodynamic, environmental and sustainability perspectives. *Energy Convers Manag* 2021;243:114403.



25. **Rakopoulos CD, Giakoumis EG.** Second-law analyses applied to internal combustion engines operation. *Prog Energy Combust Sci* 2006;32(1):2e47.
26. **Balli O, Dalkiran A, Karakoc TH.** Energetic, exergetic, exergoeconomic, environmental (4E) and sustainability performances of an unmanned aerial vehicle micro turbojet engine. *Aircraft Eng Aero Technol* 2021;93(7): 1254-1275.
27. **Akdeniz HY, Balli O.** Energetic and exergetic assessment of operating biofuel, hydrogen and conventional JP-8 in a J69 type of aircraft turbojet engine. *J Therm Anal Calorim* 2021;146:1709-1721.
28. **Balli O, Ozbek E, Ekici S, Midilli A, Karakoc TH.** Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene. *Fuel* 2021;306:121686.
29. **Balli O, Ekici S, Karakoc TH.** TF33 Turbofan engine in every respect: performance, environmental, and sustainability assessment. *Environ Prog Sustain Energy* 2021;40:e13578.
30. **Balli O, Dalkiran A.** Comparative thermodynamic, environmental and sustainability performance assessments of an aero turboprop engine utilizing jet fuel and biofuel. *Int J Green Energy* 2021. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.2005606>.
31. **Balli O.** General aviation and thermodynamic performance analyses of a micro turbojet engine used on drones and unmanned aerial vehicles (UAV). *J Aviat Res* 2020;2(2):115e41. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jar/issue/56600/726860>.
32. **Balli O.** Exergy modeling for evaluating sustainability level of a high bypass turbofan engine used on commercial aircrafts. *Appl Therm Eng* 2017;123:138-155.
33. **Balli O, Caliskan H.** Various thermoeconomic assessments of a heat and power system with a micro gas turbine engine used for industry. *Energy Convers Manag* 2022;252:114984.
34. **Akdeniz HY, Balli O, Caliskan H.** Energy, exergy, economic, environmental, energy based economic, exergoeconomic and enviroeconomic (7E) analyses of a jet fueled turbofan type of aircraft engine. *Fuel*. 2022: 322:124165.



Metal ve Alaşımlarda Toplam Karbon (C) ve Toplam Kükürt (S) Tayini, Metot Validasyonu ve Ölçüm Belirsizliği

Fatih Turan^{*1}, Sezai Şen², Caner Tulgar³, Ziya Çoban⁴

ÖZ

Ülkemiz, demir-çelik endüstrisi başta olmak üzere, metal hammadde ve uç ürünlerinin üretimi açısından dünya piyasasında büyük bir öneme sahiptir. Verimli ve yüksek kaliteye sahip bir üretim sürecinin gerçekleştirilebilmesi için malzemenin, tüm üretim süreci boyunca Karbon (C) ve Kükürt (S) konsantrasyonlarının sürekli izlenmesi gerekmektedir. Söz konusu ürünlerin pazarlanması aşamasında da, malzeme niteliklerinin uygunluk değerlendirme kuruluşları tarafından raporlanması gerekmektedir. Bu aşamada ürünlerin kalite kontrol testlerinde, ölçüm sonuçlarının doğruluğunun artırılması ve güvenilirliğinin sağlanması beklenmektedir. Bu amaçla, uygunluk değerlendirme kuruluşları tarafından gerçekleştirilen testlerde öncelikle uygulanan analiz metodunun doğrulanması ve geçerli kılınması sağlanmalıdır. Ancak bu konuda ilgili uluslararası kılavuzlarda açıklanan prosedürlerin dışında kalan farklı uygulamaların olduğu gözlenmektedir. Bu çalışmada, mevcut en iyi tekniklere örnek olarak, metal ve alaşımlarda toplam karbon (C) ve toplam kükürt (S) analizleri için "TS EN ISO/IEC 17025 Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Gereklilikler" standardında açıklanan prosedürler izlenerek yöntem doğrulama ve belirsizlik tahmini çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akreditasyon, karbon, kükürt, metot validasyonu, ölçüm belirsizliği

Determination Of Total Carbon (C) and Total Sulfur (S) In Metals and Alloys, Method Validation and Measurement Uncertainty

ABSTRACT

Our country has a great importance in the world market in terms of the production of metal raw materials and end products, especially in the iron and steel industry. In order to realize an efficient and high quality production process, it is necessary to continuously monitor the Carbon (C) and Sulfur (S) concentrations of the material throughout the entire production process. During the marketing phase of the products in question, the material qualities must be reported by the conformity assessment bodies. At this stage, it is expected to increase the accuracy and reliability of the measurement results in the quality control tests of the products. For this purpose, the verification and validation of the analysis method which were employed should be carried out by the conformity assessment bodies. However, it is observed that there are different applications that fall outside the procedures described in the relevant international guidelines. In this study as an example to the best available techniques, method validation and uncertainty estimation studies were carried out for the total carbon (C) and total sulfur (S) analyses in metals and alloys following the procedures described in the standard of "General Requirements for the Competence of Test and Calibration Laboratories".

Keywords: Accreditation, carbon, sulfur, method validation, measurement uncertainty

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 11.11.2021

Kabul/Accepted : 03.06.2022

¹ Öğr. Gör., Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir
fatih.turan@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9969-0405

² Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir
sezai.sen@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0855-4388

³ Maden Mühendisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir
caner.tulgar@ogr.deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2385-0177

⁴ Kimya Öğretmeni, Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir
ziya.coban@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6628-1317



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Increasing the accuracy and reliability of the measurement results is of critical importance in terms of ensuring the quality of the products produced in the iron and steel industry. In the analysis services performed by the conformity assessment bodies operating in our country, it is expected to use certified reference materials and estimate the measurement uncertainties in order to ensure the validity of the results. In this study, as an example of the best available techniques, for the analysis of total carbon (C) and total sulfur (S) in metals and alloys, the procedures described in the "TS EN ISO / IEC 17025 General Requirements for the Competence of Experiment and Calibration Laboratories" standard were followed, method validation and measurement uncertainty estimation studies were carried out.

Methods

Before the analysis method is used by any laboratories, it must be proven that the method is suitable for the purpose and shows the desired performance during the process. The proof of performance includes the stages of selection of the analysis method, validation and verification process, selection of method performance parameters, experimental design, determination of target values for parameters, experiment implementation together with evaluation and reporting of results.

In this study as an example to the best available techniques, method validation and uncertainty estimation studies were carried out for total carbon (C) and total sulfur (S) analyses in metals and alloys following the procedures described in the standard of "General Requirements for the Competence of Test and Calibration Laboratories".

Results and Discussions

In the study, method validation parameters were determined as homogeneity, precision, (repeatability, reproducibility), trueness, robustness, and linearity. Homogeneity studies were conducted on the same day, analysis of Eltra 92400-3050 Lot:814F certified reference material was carried out as described in the test method by 2 different personnel. According to the results obtained, the carbon content was around 0.182% C and the sulfur content was around 0.037%. Therefore, the results obtained showed a homogeneous structure.

The precision expression is used as a measure of the distribution of the results obtained from the analyses around the mean value. The measurement results are expected to be as close to each other as possible. In this study, the precision parameter is evaluated based on the data obtained from the repeatability and reproducibility studies [5]. ANOVA testing was performed after each run to verify that total carbon (C) and total (S) analysis results to verify the consistency with the ELTRA 92400-3050 Lot:814F certified reference material values. As a result of the F-test and t-test applied to the analysis results, it was observed that $F < F_{crt}$ and $T < T_{crt}$. Accordingly, it was concluded that the data produced by 2 different laboratory personnel were compatible with each other (Table 2 and Table 3). In addition, the result of the analyses carried out on different dates were evaluated in reproducibility studies. The obtained results showed that the data, which was produced as a result of the analysis processes performed by different laboratory personnel on different days, were compatible with each other (Table 4, Table 5) [6]. In trueness (Recovery) studies, the recovery values of the results obtained from the repeatability studies to the theoretical value were calculated. It was concluded that the data were appropriate since the obtained recovery results were in the range of 90 to 110 values [8]. In robustness studies; the effect of the amount of sample subjected to the analysis and the amount of tungsten powder used as an accelerator in the analysis on the results were examined. The recovery rates were calculated using the obtained data were found to be between 97.30% and 105.41%. In linearity studies, the results obtained for the validation of the utilized method should be compatible with the assumed results. At this stage, calibration graphics were plotted by using the actual values (default values) of the certified reference materials analyzed in the Eltra CS 2000 device and the values determined as a result of the analyses (Table 9, Figure 3 and Figure 4). When the plotted calibration charts are examined, it is seen that the difference between the certificate values of the reference materials and the device data is within the repeatability limits specified in ASTM E1019-18 [9]. Therefore, it was concluded that linearity was achieved between the results obtained by the application of the method used in the analysis study and the actual values of the certified reference material.

The measurement uncertainty is the definition of the distribution of the values resulting from the analysis associated with the measurement [10]. A common way of presenting the different contributions to the total measurement uncertainty is to use a so-called fish-bone (or cause-and-effect) diagram [10]. The method is based on the principle of showing all the parameters affecting the analysis result in the table and expressing the uncertainties arising from them by summing. In general, k is taken as 2 because it encompasses the 95% confidence interval. In the study, the fishbone method was applied for the estimation of measurement uncertainty [12]. The total uncertainty budget was created by summing the results obtained from the sources of uncertainty throughout the study. As a result of the calculations, the uncertainty value of the total carbon parameter was determined as 0.034784261, and the uncertainty value of the total sulfur parameter was determined as 0.112479806. The expanded uncertainty values were determined as 0.069568523 for the total carbon parameter and 0.013879155 for the total sulfur parameter, taking into account the k=2 coefficient representing the 95% confidence interval.

1. GİRİŞ

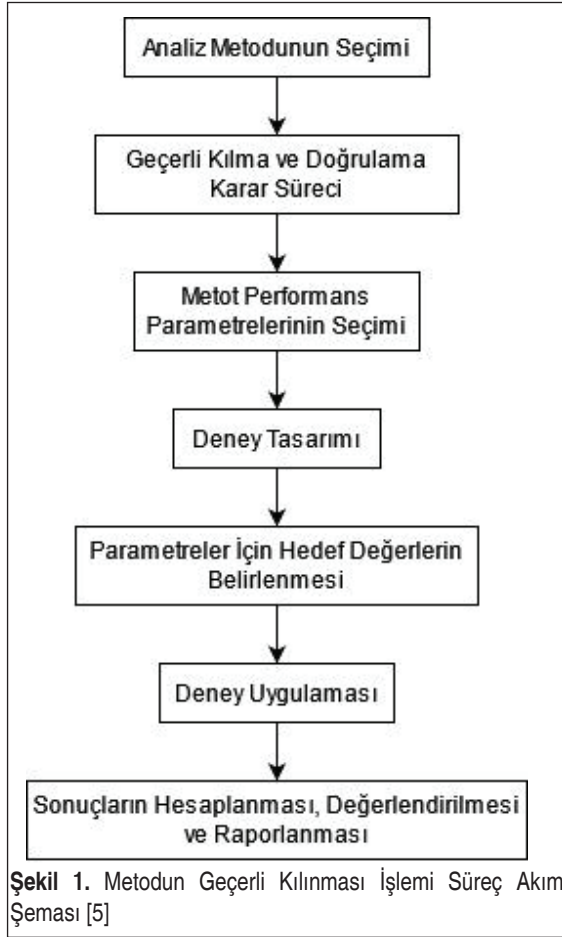
Çelik malzemelerde sertleştirici ve çekme dayanımını arttırıcı etkisiyle bilinen karbon (C) elementi, aynı zamanda diğer metal alaşımlarda da yoğun şekilde kullanılmaktadır. Diğer yandan, aynı malzemelerin çoğunda istenmeyen bir safsızlık olarak kabul edilen kükürt (S) elementinin konsantrasyonunun yüksek olması ise (örneğin; % 0,05'in üzerinde) kırılma dayanımına neden olabilmekte ve bunun yanında kaynak kabiliyetini de azaltmaktadır. Çeliklerde kükürt oranının yükselmesi ile malzemenin gevrekleşerek, darbe dayanımının azaldığı bilinmektedir. Demir-çelik endüstrisi başta olmak üzere, metal üretiminde süreçlerin kontrolü, uç ürün satışı, metal ithalat ve ihracatı, metallerin üretiminden satışına kadar tüm aşamalarda yapılacak analizler için metal ve alaşımlarda toplam karbon ve toplam kükürt analizi işlemlerinin doğrulanmış bir yöntem izlenerek yapılması büyük önem taşımaktadır [1;2;3].

TS EN ISO/IEC 17025 akreditasyonu; “ölçüm hizmeti veren laboratuvarların” ve “deney, kalibrasyon, inceleme ve belgelendirme işlemlerini yapan uygunluk değerlendirme kuruluşlarının” ulusal yada uluslararası kuruluşlar tarafından güvenilirliğinin tescil edilmesidir. Yapılan ölçümlerin kalitesi, akreditasyon kapsamında, uygulanan ölçüm metodunun geçerli kılınması ve doğrulanması, ölçüm belirsizliğinin tahmini ve dolayısıyla metrolojik izlenebilirliğin sağlanması şartlarına bağlıdır. TS EN ISO 17025:2017 standardına göre metrolojik izlenebilirlik; ölçüm sonuçlarının, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan verilerin, raporlanmış kesintisiz bir kalibrasyon zinciri vasıtasıyla uygun bir referansa bağlanması olarak tanımlanmıştır. İlgili standardın 6.5 maddesinde ise konu ile ilgili gereksinimler detaylı olarak anlatılmıştır [4].

Bu çalışmada, yapısında kükürt ve % 0,010 – 4,5 aralığında toplam karbon içeren metallerin analizi için uygulanacak metot olarak ASTM E1019-18 standardında tarif edildiği şekilde ELTRA CS2000 karbon-kükürt tayin cihazı kullanılarak indüksiyon yakma ile toplam karbon ve toplam kükürt miktarları tayini olarak saptanmıştır. Söz konusu yöntemin doğrulama ve geçerli kılma karar sürecinden sonraki performans parametreleri; homojenlik, doğruluk (tekrarlanabilirlik, tekrarüretilebilirlik), gerçeklik (geri kazanım) ve lineerlik olarak belirlenmiştir. Toplam karbon ve toplam kükürt analitlerinin ayrı ayrı analizi yapılacağından basit tekrarlı deney seti tasarlanmış ve metodun uygulanması esnasında personel, ekipman, sarf malzemesi, zaman gibi değişkenler dikkate alınarak deney planı oluşturulmuştur. Deneylerin tamamlanmasından sonra elde edilen veriler incelenmiş, yapılan değerlendirmeler sonucu her bir parametrenin deney verileri üzerindeki etkisi ayrı ayrı belirlenerek ölçüm belirsizliği bütçesi oluşturulmuştur.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Metallerin içerdiği toplam karbon ve toplam kükürt miktarının belirlenmesi için kullanılması düşünülen analiz metodunun uygulanmasından önce, metodun amaca uygun



olduğu ve istenilen performansı gösterdiğinin kanıtlanması gerekir. Metodun geçerli kılınması ve doğrulanması için gerekli akım şeması Şekil 1’de verilmiştir [4].

Deneylerde, TS ISO 17025:2017 standardının 6.5 Metrolojik İzlenebilirlik maddesinin gerektirdiği şekilde sertifikalı referans malzeme (CRM) kullanılmıştır (ELTRA 92400-3050 Lot:814F). Analiz işlemlerinde hedef değerler sertifikalı referans malzemenin “% C” ve “% S” (% 95 güven aralığında) alt ve üst değerleri olarak belirlenmiştir. Deney süreçlerinin tamamı, Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü kimya laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Karbon ve kükürt analizleri, Eltra marka CS2000 model elementel analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazda 2 adet karbon, 2 adet kükürt IR sensörü bulunmaktadır. İndüksiyon yakma sistemi ile birlikte organik malzemeler için 1350 °C ‘lik tüp fırın da bulunmaktadır.



Şekil 2. Eltra CS 2000 Karbon – Kükürt Tayin Cihazı

Analizleri gerçekleştirilecek numuneler ile deney çalışmalarına başlanmadan önce, cihaz uygulamasında çok noktalı kalibrasyon sekmesi açılarak, analizi gerçekleştirilen kör ve standart numunelerin değerleri kalibrasyon sekmesine eklenmiştir. Kalibrasyon sekmesindeki verilere, kullanılan sertifikalı referans malzeme değerleri girilerek hesaplaması yapılmıştır. Bu işlemler tüm sensörler için tekrarlanmıştır. Kalibrasyon grafiği oluşturulduktan sonra kalibrasyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Alümina krozeye 1,5g +0,2g hassasiyette granül tungsten (20-40 mesh) tartılmıştır. Daha sonra alümina krozeye 0,5g numune 0,1mg hassasiyette tartılarak konulmuş ve cihaz uygulamasına tartım 0,5 g olacak şekilde yapılmıştır. Alümina kroze indüksiyon fırınına yerleştirilerek analiz çalışmasına başlanmıştır. Deney metodunda açıklanmış olan deney tasarımına uygun olarak sertifikalı referans malzeme numunelerinin analizleri gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Metot Validasyonu (Doğrulanması) Çalışmaları

3.1.1 Homojenite

Homojenite çalışmalarında, aynı gün içerisinde, 2 farklı personel tarafından Eltra 92400-3050 Lot:814F sertifikalı referans malzemesinin, deney metodunda açıklandığı şekilde analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 1’de sunulmuştur. Tablo 1’de görüldüğü üzere iki farklı personelin gerçekleştirdiği analiz sonuçları sertifikalı referans malzeme değerleri olan % 0,182 C ve % 0,037 S etrafında toplanmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar homojen bir yapı göstermektedir.

3.1.2 Kesinlik

Deneylerden elde edilen ölçüm sonuçlarının, ortalama değer etrafındaki dağılımının

**Tablo 2.** Homojenite Çalışması Sonuçları

Ölçüm No	CRM ¹ Değeri: 0,182 %C		CRM ¹ Değeri: 0,037 %S	
	Toplam (C), %		Toplam (S), %	
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2
1	0,180	0,182	0,034	0,034
2	0,181	0,184	0,037	0,038
3	0,181	0,180	0,034	0,035
4	0,181	0,184	0,039	0,040
5	0,181	0,184	0,038	0,039
6	0,181	0,184	0,040	0,037
7	0,183	0,180	0,035	0,040
8	0,181	0,180	0,041	0,037
9	0,183	0,183	0,035	0,037
10	0,183	0,180	0,038	0,040

¹ sertifikalı referans malzeme

ölçüsü olarak kesinlik ifadesi kullanılmaktadır. Ölçüm sonuçlarının birbirine olabildiğince yakın olması beklenir. Bu çalışmada, kesinlik parametresi; tekrarlanabilirlik ve tekrarüretilebilirlik verileri ile değerlendirilmiştir. Tekrarlanabilirlik standart sapması, tekrarlanabilirlik koşulları altında elde edilen deney sonuçlarının standart sapmasıdır. Tekrarlanabilirlik koşulları deney metodunun izin verdiği kadar kısa zaman aralıklarında, aynı cihaz kullanılarak, aynı kişi tarafından, aynı laboratuvarında, özdeş numunelere aynı metodun uygulanmasını ifade eder [5].

3.1.2.1 Tekrarlanabilirlik

Toplam Karbon (C) ve Toplam (S) analizi gerçekleştirilen ELTRA 92400-3050 Lot:814F sertifikalı referans malzemesi analiz sonuçları aşağıda Çizelge 2'de verilmiştir. Elde edilen verilerin karşılaştırılması ve uyumlu olduğunu doğrulamak için her çalışmadan sonra ANOVA testi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına uygulanan f-testi ve t-testi sonucunda $F < F_{crit}$ ve $t < t_{crit}$ olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkarak 2 farklı laboratuvar personelinin ürettiği verilerin birbiri ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır (Tablo 2 ve Tablo 3).

3.1.2.2 Tekrarüretilebilirlik

Belirli bir tarih aralığında analizi yapılan Eltra 92400-3050 Lot:814F sertifikalı referans malzemesine ait kimyasal analiz sonuçları ile tekrarüretilebilirlik verileri Çizelge 4'de sunulmuştur. Elde edilen analiz verilerinin karşılaştırılması ve uygunluğunun incelenmesi amacıyla veriler üzerinde, ANOVA testi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan f-testi ve t-testi sonucunda $F < F_{crit}$ ve $t < t_{crit}$ olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar

Tablo 2. Tekrarlanabilirlik Deney Sonuçları ve ANOVA Test Sonuçları

Ölçüm No	CRM ¹ Değeri: 0,182 % C		CRM ¹ Değeri: 0,037 % S			
	Toplam C, %		Toplam S, %			
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2		
1	0,180	0,182	0,034	0,034		
2	0,181	0,184	0,037	0,038		
3	0,181	0,180	0,034	0,035		
4	0,181	0,184	0,039	0,040		
5	0,181	0,184	0,038	0,039		
6	0,181	0,184	0,040	0,037		
7	0,183	0,180	0,035	0,040		
8	0,181	0,180	0,041	0,037		
9	0,183	0,183	0,035	0,037		
10	0,183	0,180	0,038	0,040		
Ölçüm Sayısı (n)	10	10	10	10		
Ortalama	0,182	0,182	0,037	0,038		
STDSP	0,001	0,002	0,003	0,002		
RSD	0,0060	0,0105	0,0678	0,0560		
Toplam C, Anova: Tek Etken						
Gruplar	Say	Toplam	Ortalama	Varyans		
Sütun 1	10	1,815	0,1815	1,17E-06		
Sütun 2	10	1,821	0,1821	3,66E-06		
ANOVA						
Varyans Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F _{crit}
Gruplar Arasında	1,8E-06	1	1,8E-06	0,746544	0,398941	4,413873
Gruplar İçinde	4,34E-05	18	2,41E-06			
Toplam	4,52E-05	19				
Toplam S, Anova: Tek Etken						
Gruplar	Say	Toplam	Ortalama	Varyans		
Sütun 1	10	0,371	0,0371	6,32E-06		
Sütun 2	10	0,377	0,0377	4,46E-06		
ANOVA						
Varyans Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F _{crit}
Gruplar Arasında	1,8E-06	1	1,8E-06	0,334021	0,57046139	4,413873
Gruplar İçinde	9,7E-05	18	5,39E-06			
Toplam	9,88E-05	19				

¹ sertifikalı referans malzeme

**Tablo 3.** Tekrarlanabilirlik Verileri t-Test Sonuçları

t-Test: Ortalamalar İçin İki Örnek				
	Toplam C		Toplam S	
	Değişken 1	Değişken 2	Değişken 1	Değişken 2
Ortalama	0,1815	0,1821	0,0371	0,0377
Varyans	1,16667E-06	3,65556E-06	6,32222E-06	4,45556E-06
Gözlem	10	10	10	10
Pearson Korelasyonu	-0,349720232		0,404044305	
Öngörülen Ortalama Farkı	0		0	
df	9		9	
t Stat	-0,757936729		-0,7448453	
P(T<=t) tek-uçlu	0,233934903		0,237682372	
t _{crit} tek-uçlu	1,833112933		1,833112933	
P(T<=t) iki-uçlu	0,467869806		0,475364744	
t _{crit} iki-uçlu	2,262157163		2,262157163	

Tablo 4. Tekrarüretilebilirlik Deney Verileri ve ANOVA Test Sonuçları

Ölçüm Tarihi	CRM ¹ Değeri: 0,182 % C		CRM ¹ Değeri: 0,037 % S	
	Toplam C, %		Toplam S, %	
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2
25.01.2021	0,039	0,039	0,039	0,039
26.01.2021	0,036	0,040	0,036	0,040
27.01.2021	0,039	0,034	0,039	0,034
28.01.2021	0,040	0,036	0,040	0,036
29.01.2021	0,041	0,038	0,041	0,038
01.02.2021	0,038	0,036	0,038	0,036
02.02.2021	0,035	0,041	0,035	0,041
03.02.2021	0,04	0,034	0,04	0,034
04.02.2021	0,041	0,036	0,041	0,036
05.02.2021	0,038	0,039	0,038	0,039
Ölçüm Sayısı (n)	10	10	10	10
Ortalama (x)	0,0387	0,0373	0,0387	0,0373
STDSP	0,002003	0,002452	0,002003	0,002452
RSD	0,051751	0,065731	0,051751	0,065731
Ortalama Standart Sapma	0,002633289		0,002294157	

Toplam C, Anova: Tek Etken						
Gruplar	Say	Toplam	Ortalama	Varyans		
Sütun 1	10	1,81	0,181	5,11E-06		
Sütun 2	10	1,825	0,1825	8,28E-06		
ANOVA						
Varyans Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F _{crit}
Gruplar Arasında	1,13E-05	1	1,13E-05	1,680498	0,211233	4,413873
Gruplar İçinde	0,000121	18	6,69E-06			
Toplam	0,000132	19				
Toplam S, Anova: Tek Etken						
Gruplar	Say	Toplam	Ortalama	Varyans		
Sütun 1	10	0,387	0,0387	4,01E-06		
Sütun 2	10	0,373	0,0373	6,01E-06		

¹ sertifikalı referans malzeme

Tablo 5. Tekrarüretilebilirlik Verileri t-test Sonuçları

t-Test: Ortalamalar İçin İki Örnek				
	Toplam C		Toplam S	
	Değişken 1	Değişken 2	Değişken 1	Değişken 2
Ortalama	0,181	0,1825	0,0387	0,0373
Varyans	5,111111E-06	8,27778E-06	4,011111E-06	6,011111E-06
Gözlem	10	10	10	10
Pearson Korelasyonu	-0,170821664		-0,65847722	
Öngörülen Ortalama Farkı	0		0	
df	9		9	
t Stat	-1,200533689		1,090265676	
P(T<=t) tek-uçlu	0,130288031		0,151962233	
t _{crit} tek-uçlu	1,833112933		1,833112933	
P(T<=t) iki-uçlu	0,260576061		0,303924467	
t _{crit} iki-uçlu	2,262157163		2,262157163	

farklı günlerde, farklı laboratuvar personelleri tarafından gerçekleştirilen kimyasal analiz işlemleri ile üretilmiş olan verilerin birbiri ile uyumlu olduğunu göstermiştir (Tablo 4, Tablo 5) [6].



3.1.3 Gerçeklik (Geri Kazanım)

Yapılan analizlerde kullanılan metodun doğruluğunun nicel bir ölçü üzerinden saptanması için tekrarlanabilirlik çalışmalarından elde edilmiş sonuçların teorik değere olan geri kazanım değerleri hesaplanmıştır. Geri kazanım sonuçları her bir parametre ve konsantrasyon için hesaplanarak Çizelge 6'da gösterilmiştir. [7]. Elde edilen geri kazanım sonuçlarının 90 ile 110 değer aralığında yer alması dolayısıyla yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen verilerin uygun olduğu sonucuna varılmıştır [8].

Tablo 6. Geri Kazanım Deney Sonuçları

Ölçüm No	CRM1 Değeri: 0,182 %		CRM' Değeri: 0,037 %	
	Geri Kazanım, %			
	Toplam Karbon		Toplam Kükürt	
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2
1	98,90	99,45	91,89	91,89
2	100,00	100,00	100,00	102,70
3	98,35	101,10	91,89	94,59
4	101,65	98,90	105,41	108,11
5	98,35	100,00	102,70	105,41
6	97,80	101,65	108,11	100,00
7	98,35	101,10	94,59	108,11
8	97,80	100,00	110,81	100,00
9	97,80	101,65	94,59	100,00
10	97,80	98,35	102,70	108,11

¹ sertifikalı referans malzeme

3.1.4. Sağlıklik

Analiz çalışmalarında kullanılan yöntemin sağlamlığının belirlenmesi için numuneden alınan kütle miktarı ve hızlandırıcı olarak kullanılan Tungsten tozu miktarı değişimleri irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar, Tablo 7 ve Tablo 8'de sunulmuştur.

3.1.4.1. Numuneden Alınan Kütle Miktarı

Uygulanan analiz metodunun sağlamlığının belirlenmesi için ilk olarak numuneden alınan tartım miktarı değişimlerinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı miktarlarda hazırlanan numuneler tartılarak analiz işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Tartım Miktarının Analiz Sonuçlarına Etkisi

Tartım Miktarı (mg)	% Karbon	Geri Kazanım (C)	% Kükürt	Geri Kazanım (S)
112,3	0,183	100,55	0,036	97,30
306,4	0,182	100,00	0,039	105,41
544,3	0,180	98,90	0,037	100,00
668,6	0,183	100,55	0,04	108,11
756,3	0,183	100,55	0,038	102,70

Metot sağlamlığının tespitinde kullanılan parametrelerden ilki olan farklı tartım miktarları ile yapılan analizler sonucunda, geri kazanım oranları %97,30 ile %108,11 aralığında hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tartım miktarının 100 mg ile 800 mg arasında olmasının analiz sonucuna bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

3.1.4.2. Hızlandırıcı Tungsten Miktarı

Çalışmanın bu aşamasında, analiz çalışmalarında kullanılan metodun sağlamlığının tespiti için hızlandırıcı olarak kullanılan tungsten miktarı değişiminin analiz sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Analizler esnasında Eltra 92400-3050 Lot:814F sertifikalı referans malzemesi farklı miktarlarda numunelere eklenerek deney metodunda belirtildiği şekilde işlemler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Tungsten Miktarının Analiz Sonuçlarına Etkisi

Tungsten Miktarı (mg)	% Karbon	Geri Kazanım (C)	% Kükürt	Geri Kazanım (S)
1015,6	0,182	100,00	0,037	100,00
1278,3	0,182	100,00	0,038	102,70
1522,7	0,180	98,90	0,039	105,41
1782,5	0,181	99,45	0,037	100,00
2090,1	0,180	98,90	0,036	97,30

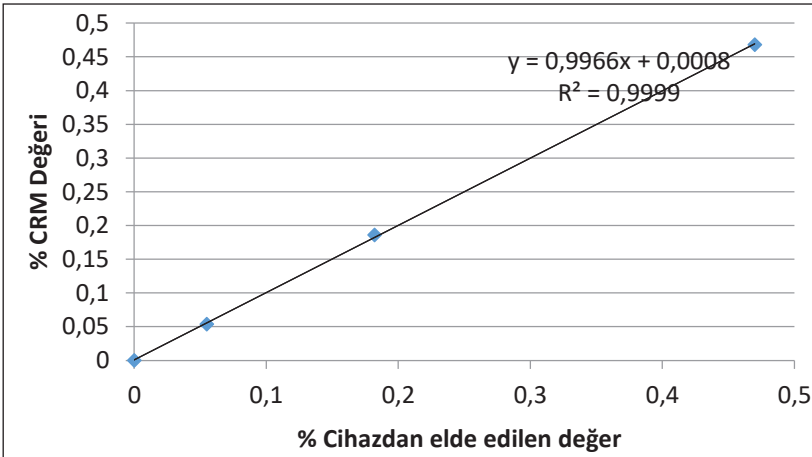
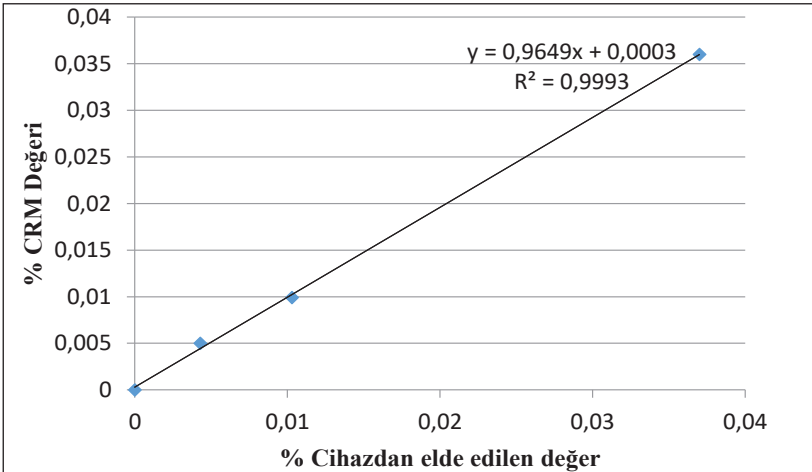
Yapılan çalışmada elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan geri kazanım oranları %97,30 ile %105,41 aralığında değişmektedir. Sonuçlar 1000 mg ile 2100 mg arasında değişen hızlandırıcı miktarının metot sağlamlığı üzerinde bir etkisi olmadığını göstermektedir.

3.1.5 Lineerlik

Analiz çalışmalarında kullanılan metodun validasyonu için elde edilen sonuçların, var sayılan sonuçlar ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu aşamada, Eltra CS 2000

Tablo 9. Sertifika Değerlerine Karşılık Olarak Elde Edilen Analiz Sonuçları

Kalibrasyon Verileri (C)		Kalibrasyon Verileri (S)	
% CRM ¹ Değeri	% Cihazdan elde edilen değer	% CRM Değeri	% Cihazdan elde edilen değer
0	0	0	0
0,055	0,054	0,0043	0,005
0,182	0,186	0,0103	0,0099
0,47	0,468	0,037	0,036

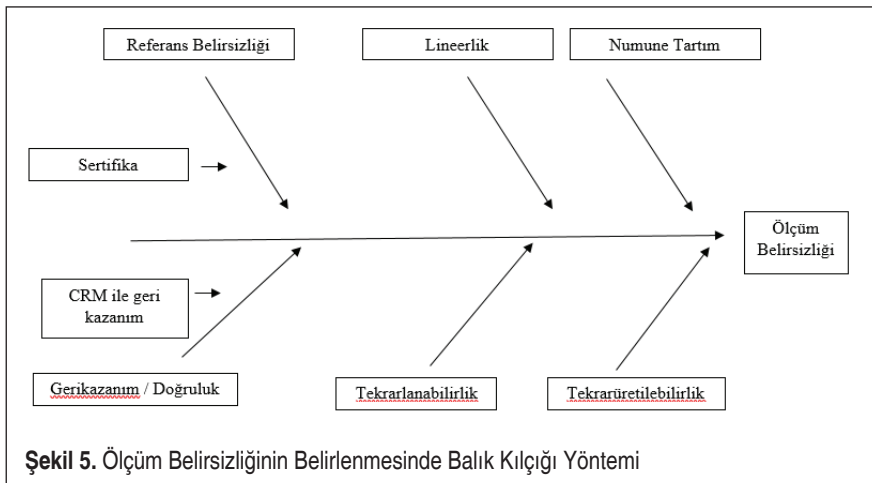
¹ sertifikalı referans malzeme**Şekil 3.** Toplam Karbon Kalibrasyon Grafiği**Şekil 4.** Toplam Kükürt Kalibrasyon Grafiği

cihazında analizi yapılan sertifikalı referans malzemelerin gerçek değerleri (varsayılan değerler) ve analiz sonucunda tespit edilen değerleri kullanılarak kalibrasyon grafikleri oluşturulmuştur (Tablo 9, Şekil 3 ve Şekil 4).

Oluşturulan kalibrasyon grafikleri incelendiğinde referans malzemelere ait sertifika değerleri ile cihaz verileri arasındaki farkın, ASTM E1019-18’de belirtilen tekrarlanabilirlik sınırları içerisinde olduğu görülmektedir [9]. Bu nedenle, analiz çalışmasında kullanılan yöntemin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar ve sertifikalı referans malzeme gerçek değerleri arasında lineerlik sağlandığı sonucuna varılmıştır.

3.2 Ölçüm Belirsizliğinin Belirlenmesi

Ölçüm belirsizliği, analiz sonucu ortaya çıkan değerlerin, ölçülen büyüklük ile ilişkilendirilen dağılımının tanımıdır [10]. Yapılan her ölçümde belirli bir hata vardır ve ölçüm belirsizliği ölçüm hatasının büyüklüğü hakkında fikir vermektedir. Ortaya konulan ölçüm belirsizliği tahmini, oluşturulan analiz raporlarının da önemli bir parçasıdır [11]. Ölçüm belirsizliğinin tahmin edilmesinde kullanılan en yaygın ifade biçimi balık kılıçığı (sebep-sonuç) çizelgeleridir. Yöntem, analiz sonucuna etki eden tüm parametrelerin çizelgede gösterilmesi ve bunlardan kaynaklanan belirsizliklerin toplanarak ifade edilmesi prensibine dayanmaktadır. Çizelgelerde kullanılan ölçüm belirsizliği verileri, laboratuvarında kullanılan sertifikalı referans malzemelerden, karşılaştırma testlerinden veya kalite kontrol kartlarından elde edilen değerlerden hazırlanmaktadır. Mevcut verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile ortaya konur. Ölçüm belirsizliği, $U=k \cdot uc$ bağıntısı ile ifade edilmektedir. Bağıntıdaki k ifadesi kapsam faktörü, u ise birleşik standart belirsizlik değeridir. Genelde k , %95 güven aralığını kapsaması nedeni ile 2 alınır. Yapılan çalışmada, ölçüm belirsizliği tahmini için, balık kılıçığı yöntemi uygulanmıştır [12].



Şekil 5. Ölçüm Belirsizliğinin Belirlenmesinde Balık Kılıçığı Yöntemi



3.2.1 Tekrarlanabilirlik

Balık Kılıçığı modeli ile tahmini yapılan ölçüm belirsizliğinin ilk girdisi, tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizliktir. Bu çalışmada, aynı gün içerisinde iki laboratuvar personeli tarafından 10 tekrarlı olarak gerçekleştirilen analiz çalışmalarının sonuçlarından yararlanarak belirsizlik değerleri, toplam karbon için, (U) 0,000347211, toplam kükürt için, (U) 0,00051908 olarak hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. Tekrarlanabilirlik Çalışmasında Hesaplanan Ölçüm Belirsizliği

Analiz	Toplam Karbon, %		Toplam Kükürt, %	
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2
1	0,180	0,182	0,034	0,034
2	0,181	0,184	0,037	0,038
3	0,181	0,180	0,034	0,035
4	0,181	0,184	0,039	0,040
5	0,181	0,184	0,038	0,039
6	0,181	0,184	0,040	0,037
7	0,183	0,180	0,035	0,040
8	0,181	0,180	0,041	0,037
9	0,183	0,183	0,035	0,037
10	0,183	0,180	0,038	0,040
Ortalama	0,182	0,182	0,037	0,038
SD	0,001	0,002	0,003	0,002
SDPool	0,001552775		0,002321398	
U (X)	0,000347211		0,00051908	
Rölatif Belirsizlik	0,001909852		0,013879155	

3.2.2 Tekrarüretilebilirlik

Yapılan çalışmada, tekrarüretilebilirlik parametresinin belirlenebilmesi için iki laboratuvar personeli tarafından farklı günlerde gerçekleştirilmiş olan analiz işlemleri sonucunda elde edilen veriler kullanılmış ve belirsizlik değerleri toplam karbon için (U) 0,000578552, toplam kükürt için ise (U) 0,000500555 olarak hesaplanmıştır (Tablo11).

3.2.3 Geri Kazanım

Çalışmada, metot validasyonu hesaplanmış olan gerikazanım değerleri üzerinden yapılan hesaplama sonucu belirsizlik, Toplam Karbon için, (U) 0,266670692; Toplam Kükürt için, (U) 1,402919955 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 11. Tekrarüretilebilirlik Çalışmasında Hesaplanan Ölçüm Belirsizliği

Analiz	R (Toplam Karbon)		R (Toplam Kükürt)	
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2
1	98,90	99,45	91,89	91,89
2	100,00	100,00	100,00	102,70
3	98,35	101,10	91,89	94,59
4	101,65	98,90	105,41	108,11
5	98,35	100,00	102,70	105,41
6	97,80	101,65	108,11	100,00
7	98,35	101,10	94,59	108,11
8	97,80	100,00	110,81	100,00
9	97,80	101,65	94,59	100,00
10	97,80	98,35	102,70	108,11
Ortalama	98,68	100,22	100,27	101,89
SD	1,247574	1,13494	6,795684	5,704915
Sdpool	1,192587589		6,274048774	
U(X)	0,266670692		1,402919955	
Rölatif Belirsizlik	0,00268144		0,013879155	

Tablo 12. Geri Kazanım Çalışmasında Hesaplanan Ölçüm Belirsizliği

Analiz	R (Toplam Karbon)		R (Toplam Kükürt)	
	Personel 1	Personel 2	Personel 1	Personel 2
1	98,90	99,45	91,89	91,89
2	100,00	100,00	100,00	102,70
3	98,35	101,10	91,89	94,59
4	101,65	98,90	105,41	108,11
5	98,35	100,00	102,70	105,41
6	97,80	101,65	108,11	100,00
7	98,35	101,10	94,59	108,11
8	97,80	100,00	110,81	100,00
9	97,80	101,65	94,59	100,00
10	97,80	98,35	102,70	108,11
Ortalama	98,68	100,22	100,27	101,89
SD	1,247574	1,13494	6,795684	5,704915
Sdpool	1,192587589		6,274048774	
U(X)	0,266670692		1,402919955	
Rölatif Belirsizlik	0,00268144		0,013879155	



3.2.4 Tartım Belirsizliği

Analiz çalışmalarında kullanılan tartım cihazına ait belirsizlik değeri kalibrasyon sertifikasında belirtilen verilerden yola çıkarak 0,2 g için 0,00008 olarak hesaplanmıştır.

3.2.5 Lineerlik

Lineerlik çalışması kapsamında, kullanılan sertifikalı referans malzemelerin sertifika değerleri ile Eltra CS 2000 cihazı kullanılarak tespit edilen malzeme analiz sonuçları kullanılarak kalibrasyon grafiği oluşturulmuştur (Tablo 9, Şekil 3 ve Şekil 4). Kalibrasyon grafiklerinin eğim değerleri hesaplanarak Tablo 13.1, 13.2, 14.1, 14.2, 15.1 ve 15.2'de verilmiştir. Elde edilen eğim değerleri irdelendiğinde ve analiz sonuçlarının lineer olduğu görülmüştür.

Tablo 13.1 Toplam Karbon Kalibrasyon Doğrusunun Eğim Analizi

Kalibrasyon Noktası	yi	a+b.xi	yi-(a+bx _i)	[yi-(a+bx _i)] ²
0	0	0,0008438	-0,0008438	7,11995E-07
0,055	0,054	0,05565902	-0,00165902	2,75236E-06
0,182	0,186	0,18223236	0,003767638	1,41951E-05
0,47	0,468	0,46926482	-0,00126482	1,59976E-06

Tablo 13.2 Toplam Kükürt Kalibrasyon Doğrusunun Eğim Analizi

Kalibrasyon Noktası	yi	a+b.xi	yi-(a+bx _i)	[yi-(a+bx _i)] ²
0	0	0,00027809	-0,00027809	7,73345E-08
0,0043	0,005	0,00442706	0,000572939	3,2826E-07
0,0103	0,0099	0,01021632	-0,00031632	1,00059E-07
0,037	0,036	0,03597853	2,1472E-05	4,61045E-10

Tablo 14.1 Toplam Karbon Regresyon Verileri

CRM ¹ Değerleri %	Cihaz Değerleri, %	x(c _i)	(c _i -c _{ort})	(c _i -c _{ort}) ²
0,055	0,054	0,053153	-0,18251	0,033311
0,182	0,186	0,185153	-0,05051	0,002552
0,47	0,468	0,467153	0,231487	0,053586

¹ sertifikalı referans malzeme

Tablo 14.2 Toplam Kükürt Regresyon Verileri

CRM ¹ Değerleri, %	Cihaz Değerleri, %	x(c _i)	(c _i -c _{ort})	(c _i -c _{ort}) ²
0,0043	0,005	0,004712	-0,01249	0,000156
0,0103	0,0099	0,009612	-0,00759	5,76E-05
0,037	0,036	0,035712	0,018512	0,000343

¹ sertifikalı referans malzeme

Tablo 15.1 Toplam Karbon Analizinde Lineerlik Kaynaklı Belirsizlik Değerleri

Kalibrasyon Fonksiyonu İçin Toplam Belirsizlik ,%	U(co)	0,002897228
Kalibrasyon Fonksiyonu İçin Toplam Belirsizlik ,Relatif	U(co-rel)	0,015940729
Kalibrasyon Fonksiyonu İçin Toplam Belirsizlik ,%	U(co-%)	1,594072948

Tablo 15.2 Toplam Karbon Analizinde Lineerlik Kaynaklı Belirsizlik Değerleri

Kalibrasyon Fonksiyonu İçin Toplam Belirsizlik , %	U(co)	0,000662
Kalibrasyon Fonksiyonu İçin Toplam Belirsizlik ,Relatif	U(co-rel)	0,017415
Kalibrasyon Fonksiyonu İçin Toplam Belirsizlik , %	U(co-%)	1,741494

3.2.6 Belirsizlik bütçesi

Tüm çalışma boyunca gerçekleşen belirsizlik kaynaklarından elde edilen sonuçlar toplanarak toplam belirsizlik bütçesi oluşturulmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucu toplam karbon parametresine ait belirsizlik değeri 0,034784261, toplam kükürt parametresine ait belirsizlik değeri ise 0,112479806 olarak tespit edilmiştir. % 95 güven aralığını temsil eden $k=2$ katsayısı dikkate alınarak genişletilmiş belirsizlik değerleri toplam karbon parametresi için 0,069568523, toplam kükürt parametresi için ise, 0,013879155 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 16. Toplam Ölçüm Belirsizliği

BELİRSİZLİK BÜTÇESİ		
Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik Değeri(C)	Belirsizlik Değeri(S)
Tekrarlanabilirlik	0,001909852	0,013879155
Tekrarüretilebilirlik	0,003183229	0,013172507
Geri Kazanım	0,00268144	0,013879155
Terazi Belirsizliği	0,00008	0,000080000
Lineerlik	0,015940729	0,017414936
CRM ¹ Belirsizliği	0,010989011	0,054054054
Toplam Belirsizlik	0,034784261	0,112479806
Genişletilmiş Belirsizlik	0,069568523	0,013879155

¹ sertifikalı referans malzeme

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Metot validasyonu ve ölçüm belirsizliğinin tahmini çalışmaları, tüm analiz işlemlerin-



de elde edilen verilerin gerçek değere yakınlığı ve kullanılan metodun analiz yapılan laboratuvarlarda uygulanabilirliğinin kanıtı olmasından ötürü büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz demir-çelik endüstrisi için metallerin üretiminden satışına kadar tüm aşamalarda yapılacak olan analizler için TS EN ISO/IEC 17025 çerçevesinde metal ve alaşımlarda toplam karbon (% C) ve toplam kükürt (% S) tayini metodunun geçerliliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada yapısında kükürt (S) ve % 0,010 - 4,5 toplam karbon (C) içeren metal örneklerinin ELTRA CS2000 karbon-kükürt tayin cihazında indüksiyon yakma ile toplam karbon (C) ve toplam kükürt (S) analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda toplam karbon ve toplam kükürt için sırasıyla, genişletilmiş ölçüm belirsizliği; 0,06957 ve 0,01388 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm belirsizliği katsayıları, analiz sonucu ile çarpılarak +/- ölçüm belirsizliği olarak kullanılmaktadır [13; 14;15]. Yapılan çalışmada, ASTM E1019-18 standardı çerçevesinde metal alaşımlarında toplam karbon (% C) ve toplam kükürt (% S) analiz metodunun laboratuvarda uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca, uygulanan metodun ölçüm belirsizliğinin tahmini yapılmış ve sonuçlar verilmiştir. Uygulanan yöntemin, söz konusu laboratuvarda metrolojik izlenebilirlik açısından da SI birim sistemleri ile kesintisiz zincir vasıtasıyla izlenebilir olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

1. **Davis, J.R.** 2001. “Carbon and Alloy Steels Alloying: Understanding the Basics”, ASM International, s. 121-254, ABD.
2. “21 Chemical Elements and Effects on Steel Mechanical Properties”, <http://www.astm-steel.com/steel-knowledge/chemical-elements-and-effects-mechanical-properties/>, 07.10.2015, Erişim tarihi: 15.09.2021.
3. **Biswas, D.K., Venkatraman, M., Narendranath, C.S., Chatterjee, U.K.** 1992. “Influence of Sulfide Inclusion on Ductility and Fracture Behavior of Resulfurized HY-80 Steel”, Metallurgical Transactions, 23A, s. 1479-1492.
4. International Organization for Standardization (ISO), 2017. ISO/IEC 17025 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
5. Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK), 2019. Metodun Geçerli Kılınması ve Doğrulanması için Bilgilendirme Kılavuzu.
6. International Organization for Standardization (ISO), 2006. ISO 3534-1:2006 Statistics — Vocabulary and symbols —Part1: General statistical terms and terms used in probability.
7. International Organization for Standardization (ISO), 1994. ISO 5725-1: 1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions. DOI:10.1029/JC095iC10p18303.
8. **Miller, J. N., Miller, J. C.** 2010. Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry Sixth edition. Pearson Education Canada.



9. ASTM E1019-18, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Inert Gas Fusion Techniques, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
10. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Geneva (1993). (ISBN 92-67-10188-9) Reprinted 1995: Reissued as ISO Guide 98-3 (2008)
11. NORDTEST NT TR 537 ed. 3.1 2017:02 Turkish
12. International Organization for Standardization (ISO), 2017. ISO 21748:2017 Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation.
13. EURACHEM, 2012. EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (third edition).
14. Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK), 2015. R20.02 Deney/Analiz Sonuçlarındaki Ölçüm Belirsizliği Tahmini İçin TÜRKAK Prensipleri.
15. EA-4/16: EA guideline on The Expression of uncertainty in quantitative testing, www.european-accreditation.org



A Survey on Post-Weld Modification of Microstructural and Mechanical Properties of GTAWed Aluminum Butt Joints Through FSP and T6 Heat Treatment

Gökçe Mehmet Genç^{1*}, Coşkun Yolcu², Fatih Kahraman³

ABSTRACT

Fusion welding is a commonly applied manufacturing process in all fields of industry. Some imperfections (formation of coarse-grained microstructure, decrease in mechanical property, etc.) can occur especially in the fusion welding-based fabrication of aluminum alloys which have specific features, such as having high thermal conductivity, expansion coefficient, high hydrogen solubility in the liquid state, and oxide layer on the surface. Therefore, the enhancement of microstructure and mechanical properties in terms of the lifespan and strength of the fusion-welded joints is crucial for most applications. In the study, the effects of friction stir processing (FSP) and T6 heat treatment, applied as post-weld processing, on the weld zone properties of the gas tungsten arc welded (GTAWed) AA6082 plates were investigated. The effects of the post-weld processes (FSP and T6 heat treatment) on mechanical and microstructural features were analyzed via microstructural examination and microhardness measurements and tensile strength testing. It was observed that the dendritic microstructure in the processed region (stir zone) of the weld bead was destroyed and fine-grained microstructure was formed via FSP. Additionally, the findings showed that heat input occurred during FSP led to broaden of heat affected zone (HAZ) and decrease the hardness in a wider region. It was also determined that the mechanical characteristics of the GTAWed joint were increased but in contrast, the toughness was decreased through T6 post-weld heat treatment.

Keywords: GTA welding, aluminum alloy, Butt welding, friction stir processing, T6 heat treatment

Tig Alın Kaynaklı Alüminyum Birleştirmelerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin SKP ve T6 Isıl İşlemi Yoluyla Kaynak Sonrası Modifikasyonu Üzerine Bir Araştırma

ÖZ

Ergitme kaynağı ile birleştirme endüstrinin her alanında yaygın olarak uygulanan imalat yöntemlerindedir. Özellikle yüksek ısı iletim ve genleşme katsayısına sahip, sıvı halde hidrojen çözünürlüğü yüksek olan ve yüzeyinde rijit oksit tabakası bulunan alüminyum alaşımlarının ergitme kaynağıyla imalatında iri tane oluşumu, mekanik özelliklerde düşüş vb. olumsuzluklar gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle ergitme kaynaklı birleştirmelerin ömürleri ve mukavemetleri açısından kaynak sonrası işlem ile kaynak bölgesinin iç yapı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi çoğu uygulama için önemli rol oynamaktadır. Çalışmamızda, tungsten inert gaz (TIG) kaynağı ile birleştirilen AA6082-T6 plakaların kaynak bölgesi özelliklerine kaynak sonrası işlem olarak uygulanan sürtünme karıştırma prosesi (SKP) ve T6 ısıl işleminin etkileri araştırılmıştır. SKP ve T6 ısıl işleminin mekanik özelliklere ve iç yapıya etkileri çekme testi, mikrosertlik testi ve mikroyapı incelemeleri ile araştırılmıştır. SKP ile kaynak dolgusunun işlem gören bölgesindeki (karıştırma bölgesi) dendritik tanelerin parçalanarak ince taneli iç yapının elde edildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, SKP'nin malzemede oluşturduğu ısıl girdi ile ısıdan etkilenen bölgenin (IEB) genişlemesine ve sertliğin daha geniş bölgede düşmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak sonrası uygulanan T6 ısıl işlemi ile kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerin arttırıldığı ancak tokluğunun azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: TIG kaynağı, alüminyum alaşımı, alın kaynağı, sürtünme karıştırma prosesi, T6 ısıl işlemi

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 19.03.2022

Kabul/Accepted : 13.06.2022

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
mehmet.genecer@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1084-7240

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
coskun.yolcu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7335-3091

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
fatih.kahraman@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1075-9171



1. INTRODUCTION

The heat-treatable 6XXX Al alloys with their superior properties, such as high specific strength, good deformability, and significant corrosion resistance are commonly used engineering materials in aerospace, automotive, and shipbuilding in order to reduce weight and fuel consumption [1-6]. By considering the application areas, gas tungsten arc welding (GTAW) and gas metal arc welding (GMAW) are extensively employed methods for joining aluminum alloys due to their high productivity, applicability, and excellent versatility features [3, 7- 9]. Even though the 6XXX Al alloys have good weldability properties, some discontinuities or defects, such as hot cracking, distortion, porosity, lack of fusion, residual stress, etc. can occur in the weld zone of fusion welded materials, by its very nature [10, 11]. Additionally, high heat input occurred in arc welding methods [12-16] causes remarkable grain coarsening in the heat-affected zone (HAZ). Especially in the welding of precipitate hardened Al alloys such as 6XXX-T6 the formed grain growth in HAZ leads to decrease hardness, strength, and ductility properties [17, 18]. Within this context, the quality of arc welded joints that particularly result in high heat input to the workpiece has an important effect on the mechanical properties of the fabricated structure.

In order to improve the mechanical and microstructural characteristics of the welded joints mechanical deformation methods, such as ultrasonic impact treatment and shot peening can be used. However, these types of methods cannot totally modify the microstructure of the material (shallow deformation) and prevent the defects, such as porosity, microcrack, etc. formed in the weld bead. Thus, these methods are not accepted as efficient enough by researchers due to their drawbacks. Recently, various studies have been carried out on the application of FSP which is a commonly used solid-state method to enhance the lifespan and properties of the welded joints [3, 5, 18-21].

In friction stir processing which is simple, clean, low cost, and environmentally friendly [22], a non-consumable rotating tool with a specific pin and shoulder profiles is plunged into the surface of the workpiece. The occurred friction-based heat between tool and workpiece increases the deformability of the material. Severe plastic deformation (also named stirring) comes true in the processed zone of the material through the traveling of the rotating tool along a specific path in the surface of the workpiece [23-25]. Thereby, the microstructure and mechanical properties of the locally processed zone of material is enhanced via dynamic recrystallization (DRX) [26, 27]. Borrego et al. [28] stated remarkable findings by using this method that identified as green energy in their study on the fatigue strength enhancement of the butt-welded aluminum alloys. In the research, the fatigue strength of the manufactured welded joints was significantly improved through the reduction in stress concentration and refinement of the microstructure.

The research done in the literature emphasizes that the enhanced properties in fusion



welded joints by employing a post-weld process are crucial in the way of performance and lifespan of the manufactured structure. In the study, the applicability of the FSP and T6 heat treatment as post-weld processing was investigated to improve the mechanical and microstructural properties of the weld zone of gas tungsten arc welded (GTAWed) 6082-T6 Al plates. The effects of the methods applied as post-weld processing on the joint quality were analyzed in comparison.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

2.1 Gas Tungsten arc Welding (GTAW)

EN AW 6082-T6 alloy with a thickness of 5 mm were used as base material. The chemical composition and mechanical properties of the wrought alloy are given in Tables 1 and 2, respectively. The plates were cut to obtain workpieces with the dimensions of 200×100 mm. The edges of workpieces were prepared considering EN ISO 9692-3:2016 standard and afterward, they were fixed on a steel table with pneumatic clamps (Fig 1.a). Before the welding process, the V-groove was brushed to remove the oxide layer, and then the possible contaminants such as oil were cleaned with acetone. The EN ISO 18273:S Al 5356 filler wire (Table 1) with a diameter of 1.2 mm and as a

Table 1. The Chemical Compositions of The Base and Filler Materials

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Cu	Zn	Ti	Al
EN AW 6082-T6	0.9	1	0.52	0.39	0.04	0.08	0.08	0.03	Balance
S Al 5356	<0.25	5	0.3	<0.4	-	-	-	-	Balance

Table 2. The Mechanical Properties of The AA6082-T6 Alloy

	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Strain (%)	Hardness (HV)
AA6082-T6	268	326	16	106

Table 3. GTAW and FSP Parameters

Parameter	
Welding current (A)	240
Welding voltage (V)	26
Welding speed (mm/min)	130
Shielding gas flow rate (L/min)	18
Wire feed rate (mm/min)	120
FSP tool rotation speed (rpm)	900
FSP tool travel speed (mm/min)	20
Tilt angle	2°

Table 4. Sample Designations in The Study

Sample	Sample ID
Welded sample	GTAWed
Friction stir processed sample following welding	GTAWed+FSPed
T6 heat treated sample following welding	GTAWed+T6

shielding gas pure argon were used in the joining process. The GTAW parameters are presented in Table 3. The single V-butt joints were fabricated throughout the rolling direction of the AA6082-T6 plates with a double pass from one side of the plates.

2.2 Post-Weld Processing

Friction stir processing (FSP) and T6 heat treatment were carried out to GTAWed samples as post-weld methods. The methods were applied separately to different samples that are fabricated with the same welding parameters. The manufactured samples were denoted as shown in Table 4 from now on. FSP was done by using a vertical milling machine. A non-consumable ISO X40CrMoV5-1 steel tool (55 HRC) was used with a cylindrical shoulder of 20 mm in processing. The conical pin, 3 mm in length, had a 6 mm diameter at the top while 5 mm at the bottom. The weld bead was FS processed with two overlapped passes (Fig 1.c). The overlapped ratio was 0.33 and determined considering [29]:

$$\text{Overlap Ratio} = 1 - \left[\frac{l}{d_{pin}} \right] \quad (1)$$

Where l designates the distance between pin axes in passes and d is the top diameter of the pin (Fig 2). In FSP, the tool was plunged 0.4 mm to welded sample and initial preheating was achieved by keeping the penetration speed constant at 1 mm/min.

T6 heat treatment that sequentially consists of solution heat treatment, quenching, and artificial aging was carried to welded samples. Solution heat treatment was done at 540 °C for 4 hours and then aged at 180 °C for 8 hours following water quenching.

2.3 Metallographic and Mechanical Testing

Metallographic examinations were performed via optical microscope at the cross-sections of the samples to characterize the weld region macro and micrographically considering the effects of the FSP and T6 heat treatment. The sample cross-sections were ground and then polished with respect to the standard metallographic methods. Afterward, samples were chemically etched with Keller's reagent consisting of 190 ml distilled water, 5 ml HNO₃, 3 ml HCl, and 2 ml HF. Additionally, Tucker's reagent

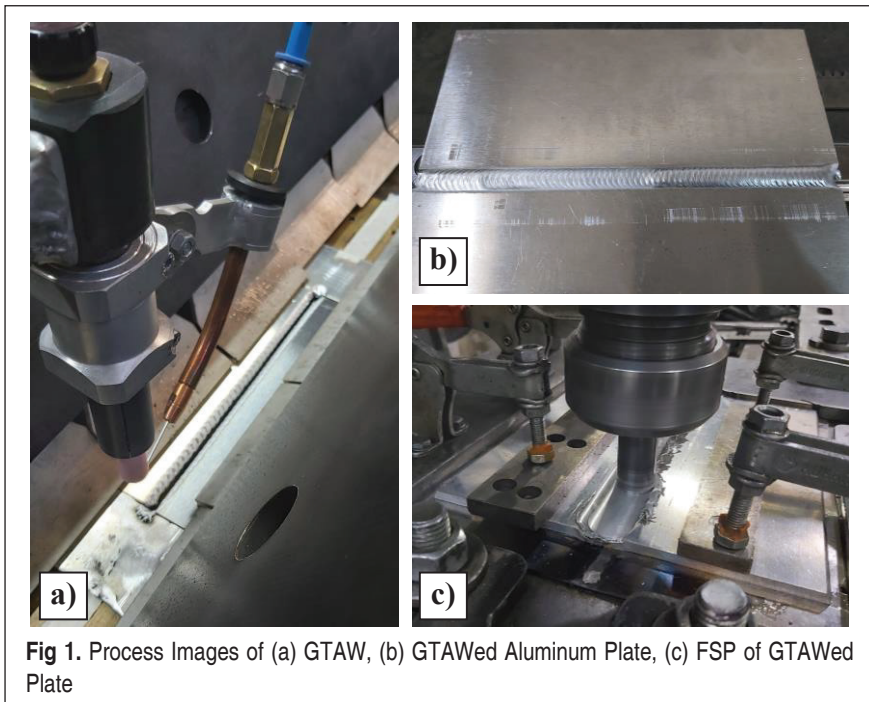


Fig 1. Process Images of (a) GTAW, (b) GTAWed Aluminum Plate, (c) FSP of GTAWed Plate

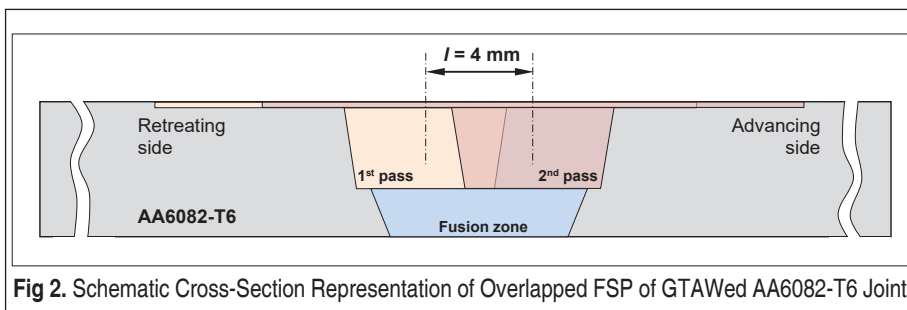


Fig 2. Schematic Cross-Section Representation of Overlapped FSP of GTAWed AA6082-T6 Joint

(45 ml HCl, 15ml HF, 15 ml HNO₃, 25 ml H₂O) was used to reveal the macro images of the weld regions.

The Vickers microhardness measurements were carried out to observe the hardness profile of the cross-sections. The indentations were made throughout a line that was 2 mm below the upper surface of the Al alloy plate. The indentations were made with a 0.2 kg load and a dwell time of 15 sec and the hardness profile of the samples was precisely obtained by arranging 0.5 mm spacing between indentations.

To evaluate the effect of post-weld processings on the tensile properties of GTAWed,

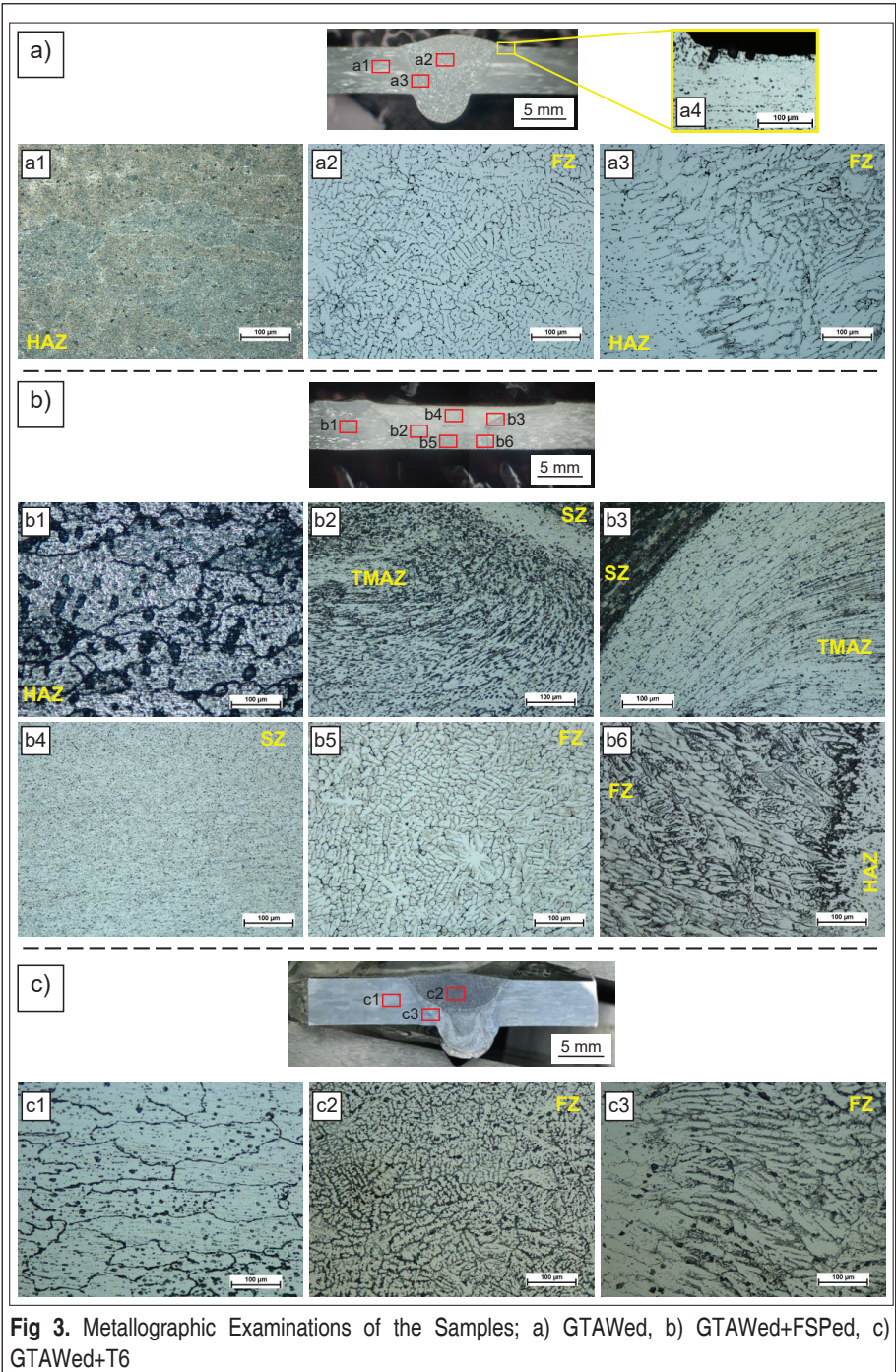


Fig 3. Metallographic Examinations of the Samples; a) GTAWed, b) GTAWed+FSPed, c) GTAWed+T6



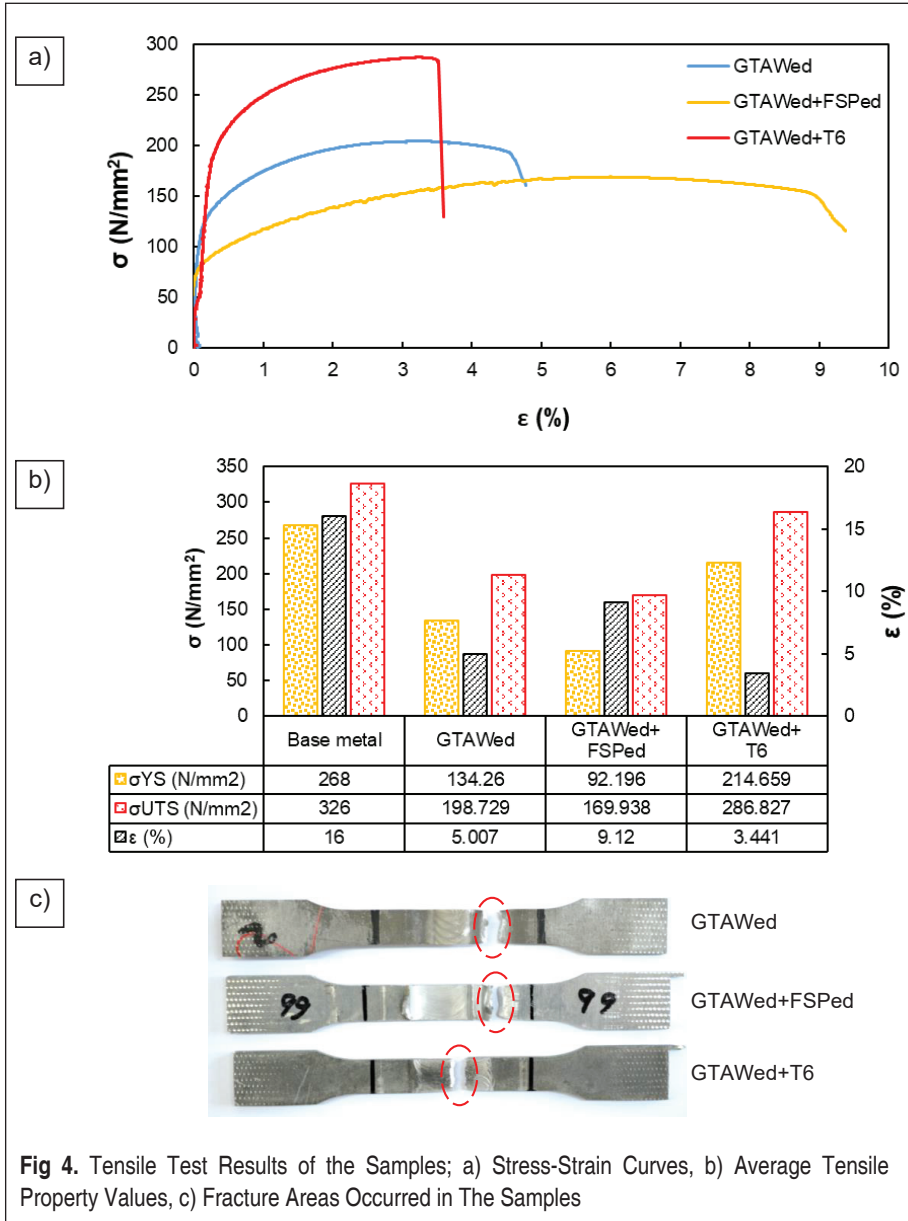
GTAWed+FSPed and GTAWed+T6 samples, tensile testing was performed. The tensile specimens were extracted through the water jet from the normal direction of the joint line. Test were carried out at room temperature by using a constant testing speed of 1 mm/min.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Macro and Microstructural Analysis

Fig 3. illustrate the cross-section macro and micrographs of the processed distinct zones of samples. It can be observed from the macrographs that there are no visible macro discontinuity/defects present in the joint (porosity, lack of fusion for GTAWed sample; tunnel defect for GTAWed+FSPed sample). However, microporosities were found at the weld toe of the GTAWed sample (Fig 3.a4). Cerit et al. [30] emphasized in their research that discontinuities at the weld toe result in local stress fields and thus, increase the stress concentration in materials. Consequently, these kinds of discontinuities at the weld toe reduce the load-bearing capacity of the welded structures. According to the research done, the elimination of defects in this region has a great effect on improving the service life of welded joints. It was determined that a high solidification rate in the weld zone increased the nucleation sites and thus, the equiaxed dendritic microstructure was obtained in the fusion zone (FZ) of the GTAWed sample (Fig 3.a2). This cast microstructure formed in the weld bead became elongated and coarsened along the heat transfer direction at the fusion line during the welding (Fig 3.a3). It can be clearly seen that the cast microstructure in the fusion zone was modified as fine equiaxed grains in the stir zone (SZ) via FSP following GTAW (Fig 3.b4-b5). The grain refinement in the stir zone comes true as a result of dynamic recrystallization caused by adequate heat input and severe plastic deformation formed in the workpiece [31]. Therefore, the low ductility of the cast structure in the processed zone was inhibited via FSP. Fig 3.b3 shows another distinct region known as thermo-mechanically affected zone (TMAZ) where the plastically deformed and thus elongated grains were obtained. Additionally, it was also observed that FSP removed micro porosities at the weld toe of GTAWed sample with the effects of high pressure and plastic deformation.

The apparent HAZ in the GTAWed sample cannot be observed after T6 post-weld heat treatment (Fig 3.c). The macrograph of GTAWed+T6 sample demonstrated two distinct zone consisted of weld bead and base material. In comparison with the GTAWed sample, there was not any obvious difference determined in the weld bead microstructure of GTAWed+T6 sample as expected (Fig 3.c2). This finding is a result of employing a non-heat treatable filler metal was used for joining.



3.2 Tensile Testing

The tensile stress-strain curves and results of the samples are given in Fig 4. The presented values are averages of the three samples for each group and curves are representations of the average values. The tensile test findings indicate that the tensile

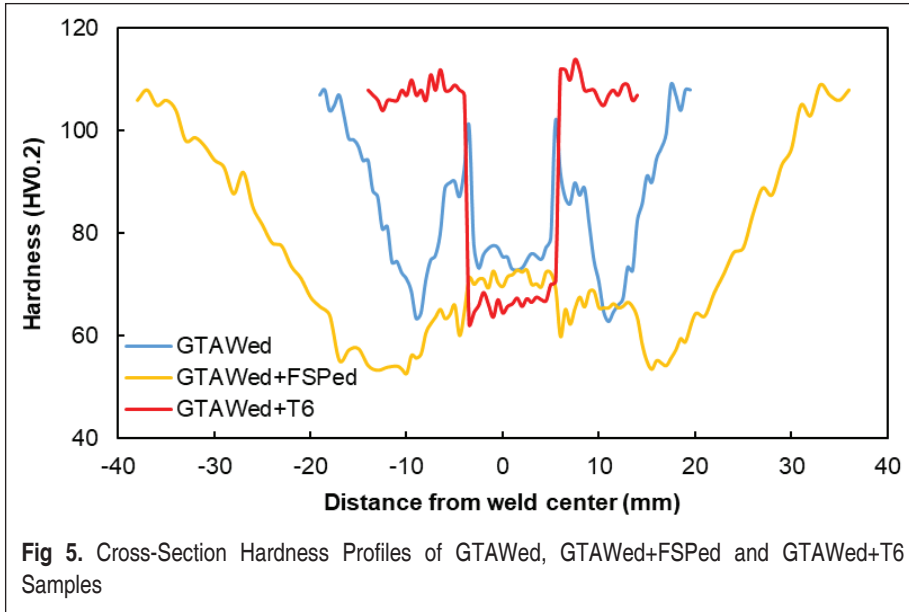


strength and ductility of the GTAWed sample significantly decreased in comparison with the base material. The reduction in ultimate tensile strength was 39.04% while it was measured as 68.75% for the strain. It is a known phenomenon that the homogeneous distribution in the structure as finer-sized β'' precipitates of the Mg_5Si_6 compound formed by alloying elements of Mg and Si existing in the 6082-T6 aluminum alloy enhances the strength of the base metal remarkably [32]. Starink et al. [33] stated that the most effective strength increasing mechanism for heat treatable aluminum alloys is obtained by precipitation hardening. Therefore, the mechanical behavior of such alloys after welding is directly related to the properties of the precipitates. The heat input during GTAW caused over-aging in the HAZ that resulted in a decrease in the mechanical properties of the joint. The cross-section hardness profile verifies this weakening in HAZ. To prevent solidification cracking defects that may form in the fusion zone of the arc welded 6XXX Al alloy, the related standards recommend using 4XXX and 5XXX Al alloys as filler materials [34]. The strength enhancement of these aluminum series is not possible by heat treatment. Besides, the dilution in base material in the fusion zone inhibits or significantly decreases the formation of β'' precipitate which consequently led to strength reduction in this zone. Thus, the mechanical property decrease following GTAW with respect to the base material is an expected fact.

It was observed that T6 post-weld heat treatment improved the mechanical characteristics of the GTAWed joint markedly however the percentage of elongation decreased to 3.44%. The reprecipitation was ensured in HAZ and base metal of GTAWed+T6 sample via post-weld heat treatment. However, a similar trend in the strength of fusion zone was not achieved through T6 due to the usage of non-heat treatable filler wire (S Al 5356). Thus, the fracture was occurred at the fusion zone that is the most mechanically critical point of the GTAWed+T6 sample. In GTAWed+FSPed sample, a large part of the weld bead was locally treated via FSP. By obtaining fine equiaxed microstructure as a result of dynamic recrystallization, FSP as a post-weld treatment enhanced the ductility of the sample in the ratio of 82.14% in comparison with GTAWed sample. It can be clearly denoted that the high heat input formed during double passed FSP (consecutively) affected the mechanical properties negatively in the HAZ by causing over-aging. Therefore, the rupture was observed at the HAZ of the GTAWed+FSPed samples as in GTAWed sample.

3.3 Hardness Measurements

Fig 5. illustrates the cross-section hardness profiles of the samples. The hardness profile showed abrupt fluctuation in the weld zone of the GTAWed sample. While the mean hardness value of the fusion zone was 76 HV, it was measured as 101 HV in the HAZ side of the fusion line. It can be seen from the profile that the distinct increase in hardness throughout the transition from FZ to HAZ then gradually decreased to a minimum value of 63.5 HV in HAZ.



The maximum hardness value in the processed zone of the GTAWed+FSPed sample was measured in the stir zone as 71 HV. Although the hardness profile did not change as abruptly as the GTAWed sample, a remarkable difference was also determined between the stir zone and HAZ of the GTAWed+FSPed sample. The hardness value has decreased to 53 HV in HAZ due to the applied consecutive heat inputs (GTAW and double pass FSP) to the workpiece. In parallel with the results of the study performed by Aliakbari et al., intense heat input coarsened the precipitates in Al alloy and thus, led to over-aging in HAZ [1]. It is obvious that the total heat input caused to widen HAZ in this sample with respect to the GTAWed sample. The hardness profiles of GTAWed and GTAWed+FSPed samples showed a similar tendency throughout the transition from HAZ to base metal and gradually increased up to base material hardness. Even though the cast microstructure in the fusion zone was refined via double pass FSP, it is apparent that the hardness in the stir zone was not changed markedly.

T6 heat treatment following GTAW gave rise to reprecipitation and thus, ensured to obtain an average hardness value of 107 HV regularly in the cross-section except for fusion zone. Consequently, the minimum hardness value (66.4 HV) was measured in the fusion zone of the GTAWed+T6 sample. The underlying reason is that the main hardness increment mechanism of S Al 5356 filler metal can be achieved by plastic deformation [28].

3.4 Fracture Surface Analysis

To get insight into the failure modes of the samples, fracture surfaces after tensile

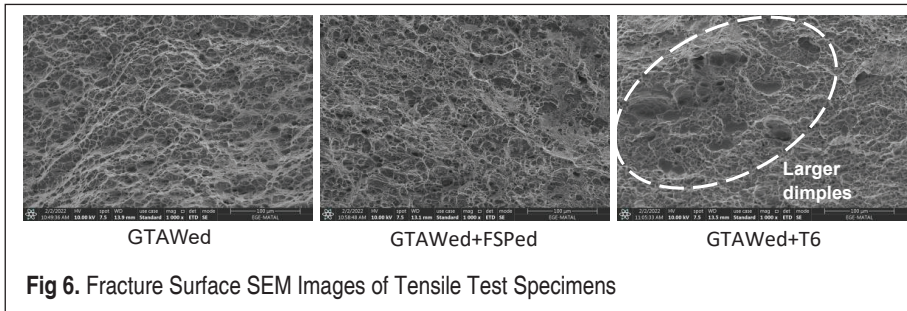


Fig 6. Fracture Surface SEM Images of Tensile Test Specimens

testing are analyzed (Fig. 6). Although relatively finer dimples were observed in the GTAWed+FSPed sample as a slight difference, the SEM fractography showed that similar fracture modes were occurred both in GTAWed and GTAWed+FSPed samples. This situation can be attributed to the occurrence of fractures in HAZ for both samples. It is evident from the SEM fractography that larger and shallower dimples were determined in the fracture surface of the GTAWed+T6 sample. In compliance with the findings, the GTAWed+T6 sample also demonstrated a ductile fracture mode in the fusion zone. However, the observed dimples in the GTAWed+T6 sample resulted in low elongation in comparison with the GTAWed and GTAWed+FSPed samples.

4. CONCLUSION

In the study, a comparative experimental survey was carried out to observe the effects of FSP and T6 heat treatment as post-weld processing on the microstructural and mechanical properties of the GTA welded AA6082-T6 butt joints. Three sample group was taken into consideration in the research: GTAWed, FSPed following GTAW, and T6 heat-treated following GTAW. The obtained conclusions can be summarized as:

- The dendritic microstructure was refined and equiaxed grains were successfully obtained via overlapped friction stir processing in stir zone that increase the ductility of the GTAWed sample by 82.14%.
- Over-aging occurred in HAZ of the GTAWed sample led to decrease hardness and thus, minimum hardness value was measured in this region of cross-section (63.5 HV).
- It was observed that consecutive heat inputs through GTAW end FSP were enlarged the HAZ in GTAWed+FSPed sample and thereby the over-aged area. The intense heat inputs caused to decrease in the hardness down to 53 HV.
- T6 post-weld heat treatment increased the hardness in the HAZ of the GTAWed sample up to 107 HV. By precipitation hardening via T6 heat treatment, the mechanical property of the GTAWed butt joints was enhanced but ductility was decreased.



ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Mustafa SAYAR and TÜREV Mechatronics employees for their valuable support.

REFERENCES

1. Aliakbari, S., Ketabchi, M., Mirsalehi, S. E. 2018. "Through-thickness friction stir processing: a low-cost technique for fusion welds repair and modification in AA6061 alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, p. 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.006>
2. Prasad, V. V., Lingaraju, D. 2017. "Effect of different edge preparations on the tensile and hardness properties of GTAW welded 6082 aluminum alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2 (A), p. 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.009>
3. Costa, J. D. M., Jesus, J. S., Loureiro, A., Ferreira, J. A. M., Borrego, L. P. 2014. "Fatigue life improvement of MIG welded aluminium T-joints by friction stir processing," *International Journal of Fatigue*, vol. 61, p. 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.11.004>
4. Walter, V., Weidenmann, K. A., Schulze, V. 2014. "A comparison of FSW, BHLW and TIG joints for Al-Si-Mg alloy (EN AW-6082 T6)," *Procedia CIRP*, vol. 18, p. 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.118>
5. Roegen, G. A., Yousefi, S. G., Emadi, R., Shoostari, M., Lotfian, S. 2021. "Remanufacturing the AA5052 GTAW welds using friction stir processing," *Metals*, vol. 11, no. 5: 749. <https://doi.org/10.3390/met11050749>
6. Mehdi, H., Mishra, R. S. 2020. "Investigation of mechanical properties and heat transfer of welded joint of AA6061 and AA7075 using TIG+FSP welding approach," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100003>
7. Gómez de Salazar, J. M., Ureña, A., Villauriz, E., Manzanedo, S., Barrena, I. 1999. "TIG and MIG welding of 6061 and 7020 aluminium alloys. Microstructural studies and mechanical properties," *Welding International*, vol. 13, no. 4, p. 293-295. <https://doi.org/10.1080/09507119909447381>
8. Rodríguez-Hernández, T., Cruz-Hernández, V. L., García-Rentería, M. A., Torres-Gonzalez, R., García-Villarreal, S., Curiel-López, F. F., Falcón-Franco, L. A. 2020. "First assessment on the microstructure and mechanical properties of GTAW-GMAW hybrid welding of 6061-T6 AA," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 59, p. 658-667. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.069>
9. Williams, J. C., Starke, E. A. 2003. "Progress in structural materials for aerospace systems1," *Acta Materialia*, vol. 51, no. 19, p. 5775-5799. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.023>
10. Karagöz, T. 2021. "TIG kaynağı yapılan alüminyum bir sac parçanın çarpılma miktarının incelenmesi," *Mühendis ve Makina*, cilt 62, sayı 702, s. 55-69. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/60660/894618>
11. Savaş, A. 2021. "TIG kaynağı ile gerçekleştirilen sert dolgu sırasında oluşan artık ge-



- rilme ve deformasyonların modellenmesi,” *Mühendis ve Makina*, cilt 62, sayı 704, s. 620-636. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.937623>
12. **Serindağ, H. T., Tardu, C., Kırççek, İ. Ö., Çam, G.** 2021. “Gaz tungsten ark kaynaklı 9Ni kriyojenik çelik bağlantının içyapı ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi,” *Mühendis ve Makina*, cilt 63, sayı 706, s. 117-137. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/68844/1085742>
 13. **Zhang, Yq., Zhang, Hq., Li, Jf., Liu, Wm.** 2009. “Effect of heat input on microstructure and toughness of coarse grain heat affected zone in Nb microalloyed HSLA steels,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 16, p. 73–80. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60014-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60014-3)
 14. **Türker, M.** 2017. “The effect of welding parameters on microstructural and mechanical properties of HSLA S960QL type steel with submerged arc welding,” *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, vol. 21, no. 3, p. 673-682. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.38730>
 15. **Nathan, S. R., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rao, A. G.** 2015. “Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints,” *Defence Technology*, vol. 11, no. 3, p. 308-317. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.06.001>
 16. **Köse, C., Topal, C.** 2019. “Effect of post weld heat treatment and heat input on the microstructure and mechanical properties of plasma arc welded AISI 410S ferritic stainless steel,” *Materials Research Express*, vol. 6, no. 6. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab09b6>
 17. **Liang, Y., Shen, J., Hu, S., Wang, H., Pang, J.** 2018 “Effect of TIG current on microstructural and mechanical properties of 6061-T6 aluminium alloy joints by TIG–CMT hybrid welding,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 255, p. 161-174. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.006>
 18. **Mehdi, H., Mishra, R.S.** 2019. “Study of the influence of friction stir processing on tungsten inert gas welding of different aluminum alloy,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, no.7. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0712-0>
 19. **Roy, S., Fisher, J. W., Yen, B. T.** 2003, “Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT),” *International Journal of Fatigue*, vol. 25, no. 9–11, p. 1239-1247. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00151-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00151-8)
 20. **Liu, C., Chen, D., Hill, M. R., Tran, M.N., Zou, J.** 2017. “Effects of ultrasonic impact treatment on weld microstructure, hardness, and residual stress,” *Materials Science and Technology*, vol. 33, no.14, p. 1601-1609. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1299277>
 21. **Abbasi, M., Givi, M., Bagheri., B.** 2020. “New Method to Enhance the Mechanical Characteristics of Al-5052 Alloy Weldment Produced by Tungsten Inert Gas,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. <https://doi.org/10.1177/0954405420929777>
 22. **Gangil, N., Maheshwari, S., Siddiquee, A. N., Abidi, M.H., El-Meligy, M.A., Mohammed, J.A.** 2019. “Investigation on friction stir welding of hybrid composites fabricated



- on Al–Zn–Mg–Cu alloy through friction stir processing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, p. 3733-3740. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.033>
23. **Badkoobeh, F., Mostaan, H., Rafiei, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Berto, F.** 2021. "Friction Stir Welding/Processing of Mg-Based Alloys: A Critical Review on Advancements and Challenges," *Materials*, vol. 14, no. 21, 6726. <https://doi.org/10.3390/ma14216726>
 24. **Ma, Z. Y., Mishra, R. S., Mahoney, M. W.** 2002. "Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy," *Acta Materialia*, vol. 50, no. 17, p. 4419-4430. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00278-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00278-1)
 25. **He, X., Gu, F., Ball, A.** 2014. "A review of numerical analysis of friction stir welding," *Progress in Materials Science*, vol. 65, p. 1-66. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.003>
 26. **Jesus, J. S., Costa, J. M., Loureiro, A., Ferreira, J. M.** "Fatigue strength improvement of GMAW T-welds in AA 5083 by friction-stir processing," *International Journal of Fatigue*, vol. 97, p. 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.034>
 27. **da Silva, J., Costa, J. M., Loureiro, A., Ferreira, J. M.** 2013. "Fatigue behaviour of AA6082-T6 MIG welded butt joints improved by friction stir processing," *Materials & Design*, vol. 51, p. 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.026>
 28. **Borrego, L. P., Costa, J. D., Jesus, J. S., Loureiro, A. R., Ferreira, J. M.,** "Fatigue life improvement by friction stir processing of 5083 aluminium alloy MIG butt welds," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 70, p. 68-74, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2014.02.002>
 29. **Gandra, J., Miranda, R. M., Vilaça, P.,** "Effect of overlapping direction in multipass friction stir processing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 16–17, p. 5592-5599. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.105>
 30. **Cerit, M., Kokumer, O., Genel, K.** 2010. "Stress concentration effects of undercut defect and reinforcement metal in butt welded joint," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 2, p. 571-578. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.010>
 31. **Mabuwa, S., Msomi, V.,** 2021. "The effect of FSP conditions towards microstructure and mechanical properties of the AA6082/AA8011 TIG-welded joint," *Materials Research Express*, vol. 8, 066514. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac0735>
 32. **Sameer, MD, Birru, A. K.** 2019. "Mechanical and metallurgical properties of friction stir welded dissimilar joints of AZ91 magnesium alloy and AA 6082-T6 aluminium alloy," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 7, no. 2, p. 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.09.004>
 33. **Starink, M. J., Deschamps, A., Wang, S. C.** "The strength of friction stir welded and friction stir processed aluminium alloys," *Scripta Materialia*, vol. 58, no. 5, p. 377-382. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.09.061>
 34. **Lakshminarayanan, A.K., Balasubramanian, V., Elangovan, K.** 2009. "Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, p. 286–296. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1325-0>



Welding Order and Welding Penetration Levels' Impact on Product Life Cycle For GMAW

Ceren Bilgili^{*1}, Sibel Uygun², Gizem Yılmaz³

ABSTRACT

Gas metal arc welding is a high-speed, economical process that is also called as "metal inert gas welding" or "metal active gas welding" which are sub-types of gas metal arc welding. This method is used for production of different parts in many industries. In this paper, the focus will be on automotive applications of this process and the impact of the parameters of this production method on the durability performance of the axle component of a vehicle. Experiments have been conducted on the axles that have been produced in serial life production conditions and have been investigated under real life road load conditions to determine their performance levels. After theoretical calculations and physical tests, each measured improvement had been documented for every parameter of the welding process. All this data had been analyzed in detail and these parameters' projected impacts on the axle life cycle had been evaluated with respect to the serial life usage condition expectations.

Keywords: Axle, durability, FEA, passenger vehicle, welding penetration, arc welding

Gaz Altı Ark Kaynağı Prosesinde Kaynak Sırası ve Kaynak Penetrasyon Seviyesinin Ürün Ömrüne Etkileri

ÖZ

Gaz metal ark kaynağı, gaz altı kaynağının alt türleri olan "metal inert gaz kaynağı" veya "metal aktif gaz kaynağı" olarak da adlandırılan yüksek hızlı, ekonomik bir işlemdir. Bu yöntem birçok endüstride farklı parça üretimleri için kullanılmaktadır. Bu bildiriye, ilgili sürecin otomotiv uygulamalarına ve bu üretim yönteminin parametrelerinin bir aracın aks bileşeninin dayanıklılık performansı üzerindeki etkisine odaklanıldı. Dayanım performans seviyesi değişiklikleri; seri hayat imalat koşullarında üretilen ve gerçek hayat yol yükü şartlarında test edilen akslar üzerinde tespit edildi. Teorik hesaplamalar ve fiziksel testlerden sonra, kaynak işleminin her parametresi için ölçülen her iyileştirme belgelendi. Tüm bu veriler detaylı bir şekilde analiz edildi ve bu parametrelerin aks ömrü üzerinde öngörülen etkileri, seri ömür kullanım koşulu beklentilerine göre değerlendirildi.

Anahtar Kelimeler: Dayanım, FEA, yolcu aracı, kaynak penetrasyon seviyesi, arc kaynak

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 07.12.2021

Kabul/Accepted : 21.06.2022

¹ Oyak Renault, Bursa
ceren.bilgili@renault.com, ORCID: 0000-0003-4244-0859

² Oyak Renault, Bursa
sibel.uygun@renault.com, ORCID: 0000-0002-1628-4074

³ Oyak Renault, Bursa
gizem.yilmaz@renault.com, ORCID: 0000-0003-3058-8370



1. INTRODUCTION

The Gas Metal Arc Welding (GMAW) is a well-known welding procedure since 20th century. Due to its low cost, flexible adjustment ability, ease of use and ease of application, this process has been favored by the industry. This method of production enabled the industry to utilize steel effectively and with higher performance. Recently, robotic applications of welding have been preferred instead of manual operations especially for arc welding, e.g., the automotive industry depends, most of all, on weld robots to keep its production line always operational. For the evaluation of the environmental impacts of state-of-the-art welding technologies, Life Cycle Assessment method has been applied. This study shows the differences between the manual metal arc welding, laser arc-hybrid welding and two gas metal arc welding process performances. Results of this study have been analyzed and improvement strategies have been documented [1].

On another note, since gas metal arc welding is one of the arc fusion processes that is widely used in industry due to its high efficiency, the direct influence of the correct selection of the input parameters on the weld quality has been analyzed as well. With this analysis, it has been shown that with the control of those parameters, it is possible to reduce the amount of weld material, improve its properties and then increase the productivity of the process. The selected method of optimization for this study was Taguchi Method and the impact of the parameters has been investigated via Variance Analysis (ANOVA). This study focused the attention on the weld voltage, weld speed and weld torch angle. The influence levels of each parameter have been documented extensively by observation of the geometrical and mechanical properties, transversal tensile strength and macrography results. The selected methods were suitable to resolve this kind of problem. The experiment was efficient, and the results were good [2].

In this paper, the focus will be on automotive applications of gas metal arc welding process and the impact of the parameters of this production method on the durability performance of the axle component of a vehicle.

Experiments have been conducted on the axles that have been produced in serial life production conditions and have been checked under real life road load conditions to determine their performance levels.

After the analysis of these tested parts, process improvement studies have been organized to achieve the desired performance levels of the durability tests of the rear axles. The adjustments that have been mentioned in this paper are directly linked to the welding parameters.

There are a lot of points that can have an impact on the durability performance, however, to be able to limit the study in a certain area, for this paper the focus is only



on the two of these process parameters. The other varying factors can be checked in other studies.

2. INFORMATION ON WELDING, AXLE AND VALIDATION TEST

2.1 Welding

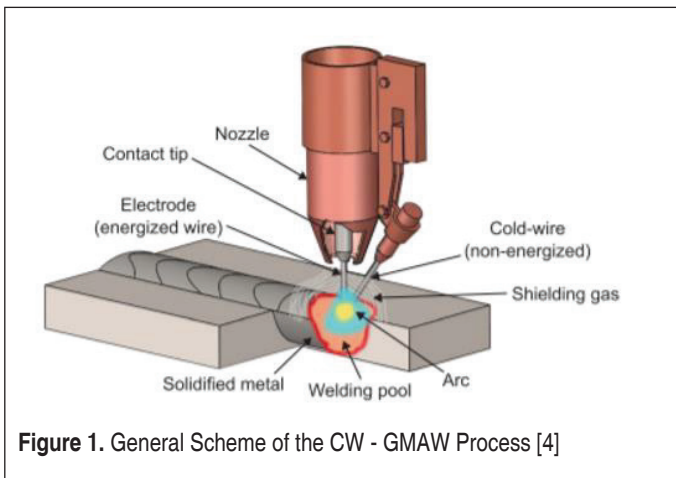
2.1.1 Arc Welding

Arc welding is a method to merge workpiece metals with a consumable which is generated by electric power.

Gas Metal Arc Welding (GMAW) is also called MAG/MIG. Metal Active Gas (MAG): It is a welding process with welding wire under an active gas protection (pure CO² or Argon/CO² or Argon /CO²/Oxygen mixture), generally used for welding mild steel.

This welding process can be automatic or semi-automatic in which an electric arc is created between the consumable wire electrode and the metals that heats the parts and causes them to melt and join. [3]

General scheme of the CW – GMAW process can be seen in Figure 1 [4].



Metal Inert Gas (MIG): It is a welding process with welding wire under an inert gas protection (pure Ar or Argon/Helium mixture), generally used for welding aluminum alloys thus are out of this paper's scope.

2.1.2 Parameters of arc Welding

Arc welding process has too many input parameters including voltage, current, travel speed of torch, welding wire diameter and angle, wire feeding speed, welding gas, etc.



All these parameters have different effects on the welding performance. The impacts of these parameters on the welding bead performance are observed on the final products with different methods.

One of the methods to check the conformity of welding is to have a macro analysis on the welded section. In this analysis, it is possible to determine the penetration level of the welding on each component, to check the height of the welding, along with the shape-smoothness of the welding bead. It is also possible to observe the gap between the two components [5].

The second method to check the conformity of the welding is to have physical durability performance test of the final product.

For the component, rear axle, that has been analyzed for this paper, periodical visual controls of the welding beads, macro cuts, synthetic durability tests have been performed to make sure that the performance is at the expected level.

2.1.2.1 Welding Parameters

Welding parameters impact welding bead quality which has a direct correlation with durability performance of the component. In this paper the focus is on the variation between results when welding parameters and welding beam characteristics are changed.

2.1.2.2 Part Features

Required part features are decided at the beginning of the project and being verified with calculations. These features can be categorized as the material(s), thickness of the parts, type of joints, welding position, manufacturing tolerances, dispersions to be "absorbed", gaps between the parts, dispersion on joint position, surface conditions (cleaning), etc.

All these features are checked at the beginning of the physical tests. In case of any nonconform results during physical tests, first supposition is these features are correct and conform.

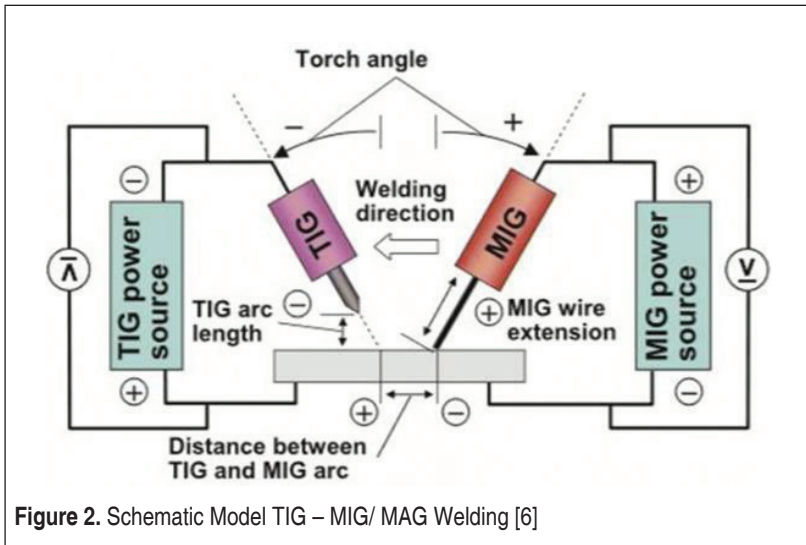
2.1.2.3 Main Welding Parameters

These parameters directly come from welding process and effect welding beam quality.

Parameters are decided at the prototype production stage and will be verified with several controls such as visual control, macro cut, bead length controls and if all the results of these were acceptable, lastly durability test.

These parameters can be categorized as consumables (welding wire, gas), power source parameters (wire speed, voltage...), robot trajectory (travel speed, position of the arc impact, torch angles, etc.), which can be seen in Figure 2 [6]. Welding sequence is another parameter that cannot be shown in a diagram; however, that needs to be

mentioned since it will be one of the parameters that will be focused on in this paper along with welding penetration level.



2.1.2.4 Principles of Welding Sequence Determination

Welding sequence to ensure that the parts are joined properly and in line with the performance requirements of the final part is determined at the beginning of the project based on the stress calculations. Aim is to maintain stable connection between the parts throughout axle's life cycle.

During the welding process, the parts to be joined are heated locally up to the melting temperature of the material. However, the cooling process is slow compared to the warming process. This phenomenon causes local shrinkage, residual stress formation, and distortions on the parts. Residual stress, that forms on the welded parts, causes brittle fractures [4].

The magnitude and distribution of residual stresses, general welding conditions and analysis of their effects on the axle's life cycle are kept out of scope of this paper. To avoid this brittle formation and distortion on the parts, the sequence of the welding beads is modified which is one of the focuses of this paper.

2.2 Rear Axle

An axle is a support system for the weight of the vehicle which is a central shaft for a rotating wheel or gear. The number of the axles in the car depends on the type of the vehicle. In this paper, the focus will be on the passenger vehicles with two axles.

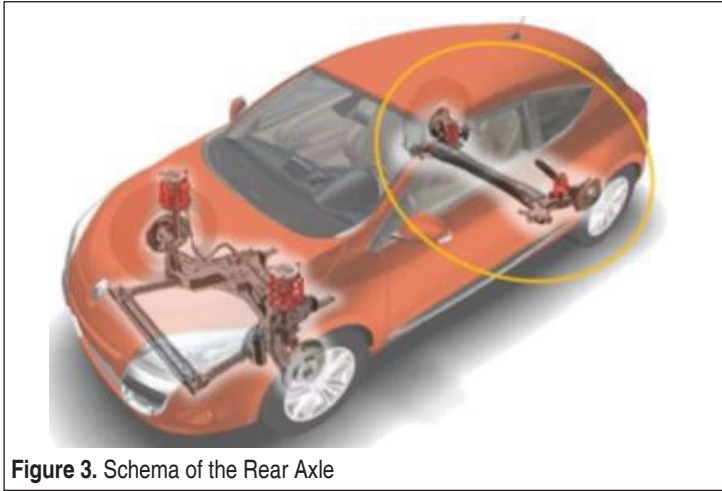


Figure 3. Schema of the Rear Axle

The axle that will be worked on is the rear axle which is highlighted in Figure 3.

The rear axles must endure the weight of the vehicle body, driving thrust, torque reaction and side thrust. To achieve this, different types of axles can be utilized. In figure 4 a sample version of typical twist beam can be seen in detail. [7].

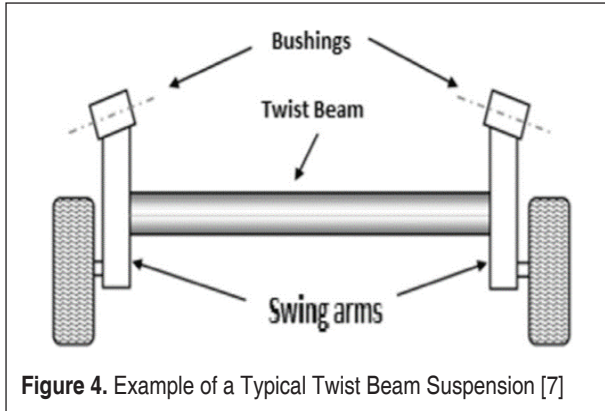


Figure 4. Example of a Typical Twist Beam Suspension [7]

The axle that will be worked on for the scope of this paper is a H shaped twist axle. There are several components that need to be joined properly to be able to provide the necessary performance for the duration of the vehicle life. The parts of the axle are joined via GMAW.

2.2.1 Components of Rear Axle

The H shaped twist beam consists of trailing arm, cross member, axle head, spring seat, anti-roll bar and couple of other supporting parts which are shown in Figure 5.

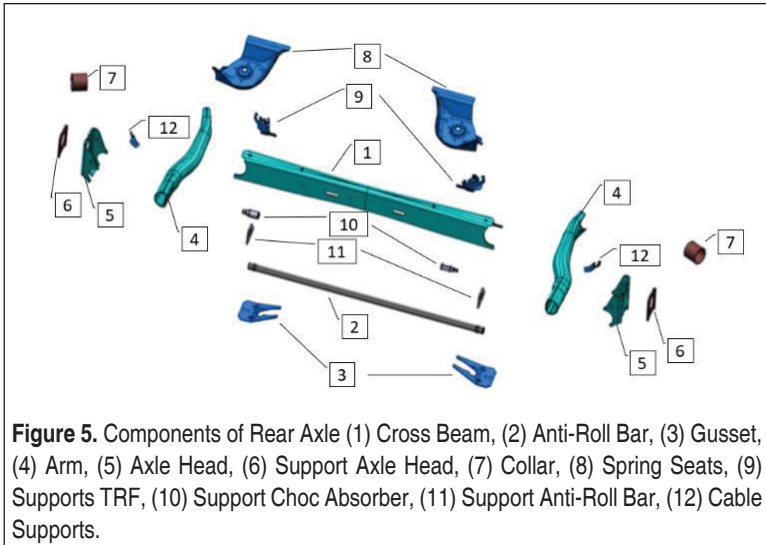


Figure 5. Components of Rear Axle (1) Cross Beam, (2) Anti-Roll Bar, (3) Gusset, (4) Arm, (5) Axle Head, (6) Support Axle Head, (7) Collar, (8) Spring Seats, (9) Supports TRF, (10) Support Choc Absorber, (11) Support Anti-Roll Bar, (12) Cable Supports.

All these components are being produced by stamping, machining, roll forming, forging, etc. The production method has been decided at the beginning of the project for each component based on the vehicle requirements along with the material grade and the thickness.

During the project development phase, the performance of each component is being checked and necessary alterations are being implemented. It is important to have a correlation between the physical test result and calculations. Other than the conformity of the components another key factor to be able to reach the desired correlation is welding operation. Based on this information, performance improvement of the rear axle can be achieved.

2.2.2 Rear Axle Welding Criteria

The welding beams are classified into classes regarding applied forces to beams and product characteristics hierarchy. These classes are defined according to customer risk analyses and to the level of stress. Each class corresponds a monitoring plan and appropriate welding criteria. Product characteristics hierarchy determines the consequence of failure for the customer. The level of stress determines the degree of risk of the failure occurring. The constraints are evaluated by simulation computation and validated by mechanical tests. [3]

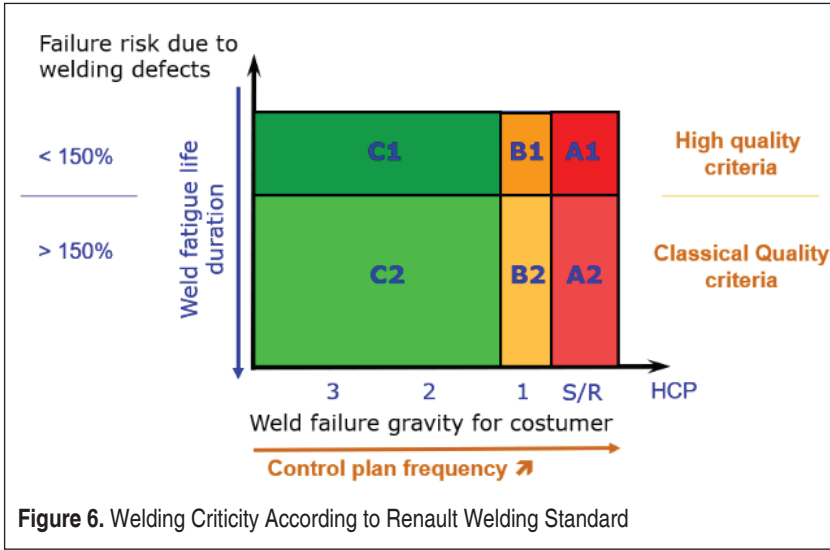
2.2.3 Welding Criticity For Rear Axle

A certain durability performance level will be set up for the rear axle depending on the conditions that the vehicle will be used under. Sample graph that shows the differences of the criticity level of the welding beam can be seen in Figure 6. Based on

this level, the criticality of the welding beads will be determined considering customer impact.

For the security impacts, immobilization and the non-conformities that will disturb customer without any life-threatening risks.

The performance of the welding beads will be checked throughout the life cycle of the vehicle with periodical controls.



2.3 Validation Tests

The purpose of durability test is to evaluate the durability behavior of an axle on a certified test facility by introducing synthetic stresses through the intermediary of false wheels. Equipment of the test bench for durability performance can be seen in Figure 7.

The test equipment simulates all the forces that the axle will be subjected to in real life usage on vehicles in rapid form. The signals are collected via test vehicles prior to the construction of the test sequence. These signals are stored and updated periodically. Each type of road condition has a different type of test signal sequence. The movements of the rear axle have also different type of signal sequences.

All these conditions and movement requirements are simulated during the test in x, y and z directions to ensure the relation of the test to the real-life situations. The testing program that is being used at the validation level of the axle is repeatedly modified and corrected version of the initial form with the support of the crosschecks are performed during the development phases of the axle. Simulations, 6-axis tests, and con-



Figure 7. Durability Performance Test Bench With Automatic Control For Rear Axles

centrated version of fatigue tests are continuously and closely monitored to find the right correlation and to make sure all these tests represent the real usage conditions.

2.3.1 Expected Performance Of The Rear Axle

Axles require high level of capacity for endurance and fatigue because of the twisting & untwisting during driving. At the beginning of the design period the collected signals from the real users are transformed into theoretical loads on rear axle to determine the expected performance. These expectations consist of durability, acoustic, vibrations, hardness, corrosion, drivability, handling, etc. For this paper the focus will be on the durability performance of the rear axle.

The durability performance needs to cover the complete vehicle life cycle for the conditions of the worst driver possible. The theoretical loads, which have been calculated from the road signals, are turned into bench test input. Once the rear axle is welded it needs to be durable enough to pass the bench test with expected performance.

The test is carried out on a fitted axle (with wheel assembly, joints, bearings, etc.), fixed to a rigid frame by train / body fixing points representative of the vehicle configuration. The stresses are introduced using independent and synchronized actuators. The



stresses are introduced at the dummy wheel. Suspension parts (springs, shock absorbers, stops, buffers), the rubber joints, are therefore not validated during this test but remain under surveillance in the event of an anomaly (breakage or premature wear).

This durability performance test allows the damage seen on the axle during its serial life cycle usage to be reproduced in an accelerated manner where the progress of the deformations can be monitored closely. Only the welding beads' forms and the axle components' performances are followed and documented during this test, not the environmental components such as bushings, springs, etc.

2.3.2 *Fatigue Failure - Durability*

Durability: Ability of an item to perform a required function under conditions usage and maintenance data, until a limiting state is reached.

Reliability: Ability of an item to perform a required function, under conditions data usage, during a given time interval.

Failure Mode: How a system may stop to perform its functions. Failure mode expressed in physical terms (rupture, fatigue, jamming, leakage, short circuit) chemical or other, which resulted in failure. For different usage periods there are several failure levels of gravity.

2.3.3 *Fatigue Mechanism*

Welding beads are natural sites for cracks to appear. In this paper the focus will be on the welding beads of rear axle.

The welding beads create a fragile area on the parts. Thus, it is important to make sure that the welding beads are conform. The beginning and end sections especially form high stress concentration. The cracks can appear around these regions during the durability performance tests of rear axles. In this paper, the performance of welding beads which are located around the trailing arm and head axles will be inspected.

3. EXPERIMENTAL STUDIES

To ensure the durability performance of the rear axle, it is mandatory to complete a set of physical tests with components that have been produced in serial conditions. For these series of tests, the components' conformity levels should be documented in detail (geometry, material, etc.) After making sure that the components are conform, the rear axle can be welded.

The welded axle should be controlled for the geometrical conformity as a follow up step. If the position cotes of the complete axle are within the tolerance limits, next step is to check the conformity of the welding beads. For this check there are two steps: 1. visual control 2. macro cuts. Once these results are documented, it is possible to test a rear axle from the same production batch (preferably $n+1 / n-1$, n =macro cut part)



Figure 8. Welding Failure on the Arm

on durability test bench where n is the part that is destroyed for macro cut procedure thus is no longer valid for physical test, $n-1$ and $n+1$ are the before and after parts of it.

The durability test benches simulate the road and driving conditions and their impact on the axles. The signals are gathered and designed specifically for each project. During and after each test, every single welding bead will be closely examined for cracks & failures. Some of the failure examples can be seen in Figure 8.

If it is necessary, improvement studies will be performed to make sure that the axles are respecting the desired durability level. There are two specific levels for the durability tests: first one is the crack appearance and the second one is the loss of function. To be able to successfully complete the test and respect the conditions of the validation requirements, it is mandatory to pass both levels with acceptable results.

For this paper, the focus will be on the final series of physical tests and the improvement studies that have been performed on the axle head-trailing arm welding beads specifically.

For this vehicle, there are 3 different rear axle types. The specifications depend on several vehicle criteria (engine type, brake type, tire – wheel dimensions, etc.). For this paper, two types will be examined: light and heavy versions.

The scheduled number of tests have been listed as 8 for this rear axle. To be able to get the validation approval from the component experts, it is mandatory to pass all the tests with acceptable results for both levels.

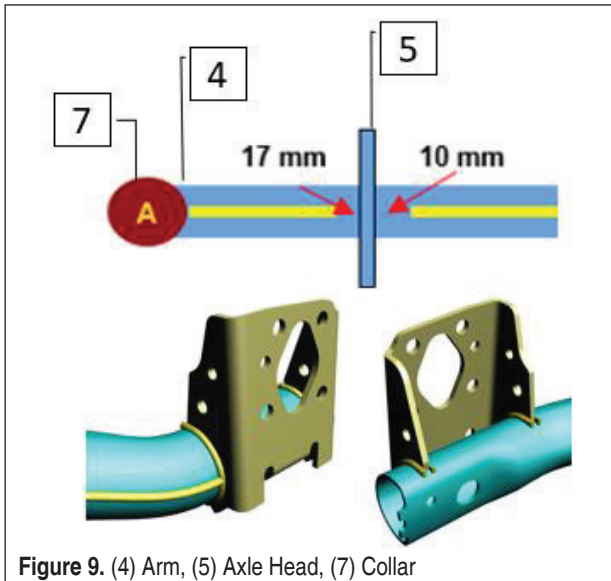
3.1 Improvement Studies

The initial test results showed early cracks around the axle head – trailing arm welding bead.

Since the geometry of the parts have been confirmed prior to the test, the improvement studies have been focused on the welding parameters. The first thing that have been checked was the penetration levels of the welding beads.

To make sure that the levels are at the desired level, the depth of the penetration has been checked with 5mm intervals on the welding bead after the test failed. It was visible that the middle section of the welding beam did not fit the criteria. The macro cut results of the n-1 & n+1 rear axle showed close to the limit values for those regions as well. Thus, the first action of improvement was decided as increasing the penetration of the welding bead in the middle section for the axle head – trailing arm assembly. The activity has been organized as an additional welding bead on top of the current route. After the completion of the welding beads in serial life production conditions, the macro cuts of the same region have been compared. The results showed major improvement for the welding penetration level in the middle section of the welding bead.

In parallel, the stress levels of the same region have been checked. There are four different welding beads in a very small region which will create extra stress for that area. In Figure 9, the welding bead positions can be seen for arm, axle head and collar section of the rear axle.





It is known that high stress can cause cracks under additional loads. Thus, the sequence of the welding beads has been recorded for this additional welding beads.

After the trial of the second sample, the attempt was once more failure. However, the cracks appeared at a much later period, yet again felt short of the desired level. To be able to continue with the improvements of the welding performance, the welding beads sequence has been changed to make sure that additional stress for the aforementioned region will not be created. Also, the beginning and ending portions of the welding beads have been analyzed to see the penetration level and the bonding of the components. The results were at the acceptable level for this aspect. Thus, the positioning of each component on the welding jig was also conform just as the geometry of each component. Because of this conformity, the stress levels have been checked one more time. To eliminate the extra stress, it was decided to leave certain gaps between each welding bead's beginning and ending points (gap: distance between welding beads). The ability of this application depends solely on the equipment that is being used in the welding cell along with the welding fixture's movement capacity. For these rear axle components, the gaps have been defined in simulation studies after the completion of the prior etudes.

Then the decided values have been applied on the third rear axle with the addition of the initial improvement studies. With all these activities in line, it was possible to pass the initial crack limit with flying colors and focus on the loss of function level.

For the second and final level of the validation test, it was necessary to pass the defined limit of the bench with all functions of axle intact which means no fractured components and no separated-cracked welding beads. To be able to determine what needs to be done at which level on which component or welding bead, the tested parts are being checked within short periods with visual equipment & chemicals which allow the cracks & fractures to become visible for the test operator. The duration of this test has been set as 2 complete weeks for this axle. The checks have been performed every 4 hours by the test operator. After the passage of the no crack level, the axle is being watched regularly till the end of the test. For this axle, after the welding beads have been improved with the first three axles, there were no additional failures and / or faults for the remaining period. Thus, it was not necessary to perform additional analysis and etudes. The initial studies were sufficient to improve the performance of the axle and all eight tests have been completed without any problems. [3]

4. RESULTS

Each improvement action resulted with different impact level on the durability performance of the axle.

For the light version of the axle, small crack formation completely disappeared in the



time it took until half of the test was finished. The cracks that have been detected at the beginning of the study around trailing arm and axle head welding beads shrunk down to half of their initially measured sizes. Other cracks that have located around traverse completely disappeared till the end of the durability test.

As for the heavy version of the rear axle, the crack appearances around traverse region have been successfully eliminated completely till the end of the test. For the function loss level criteria that has been set for the durability checks, desired level has been achieved and more than 70% of the tests that have been performed passed beyond the target levels.

5. CONCLUSIONS

In serial life production of this vehicle, the macro cuts and the durability tests of this axle are being checked with regular intervals. In case of non-conformities, the improvement studies will be implemented immediately, and the parts will be blocked till the confirmed solution is in place.

For the axle that has been mentioned in this paper, it was not necessary to continue with the improvement studies once the results showed confirm values with respect to the expectations. The performance of the axle has been improved via the adjustments of the welding parameters and the sequence of the welding beads. This approach enabled achieving the desired results faster in comparison to the component design modifications which require tool, mold, equipment modifications. This additional activity would have taken extra time to complete and would have created extra cost for the project. The process adjustments were fast, cheap, and sufficient to reach the targets. All the variables that are related to the welding parameters had been evaluated separately and the outcomes of each adjustment had been documented, then followed closely. This methodology showed the required performance levels can be achieved without the design changes of the components up to certain levels.

Thus, unless there is a change with the material and / geometry of the components of the axle, or any other modification during the production steps, equipment, parameters, or on the environmental components of the axle, or expectations of the axle – vehicle performance, etc. there will be no need for adjustments and additional calculations, etudes. The approved version will have the necessary performance level throughout the vehicle life.

REFERENCES

1. **Sproesser, G., Pittner, A., Chang, Y., Finkbeiner, M.** (2015). Life Cycle Assessment of welding technologies for thick metal plate welds, *Journal of Cleaner Production* 108(5), DOI:10.1016/j.jclepro.2015.06.121



2. **Casarini, A., Coelho, J., Olivio, E., Braz-César, M., Ribeiro, J.** (2020). Optimization and Influence of GMAW Parameters for Weld Geometrical and Mechanical Properties Using the Taguchi Method and Variance Analysis, DOI: 10.18502/keg.v5i6.7097
3. **Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J.** (2012). Advanced gas metal arc welding processes, *Int J Adv Manuf Technol*, DOI 10.1007/s00170-012-4513-5
4. **Costa, E., Assunção, P., Dos Santos, E., Feio L., Bit-tencourte, M., Braga E.** (2017). Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*.
5. **Fei, Z., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Wu, B., Ding, D., Su, L.** (2019). Effect of Heat Input on Weld Formation and Tensile Properties in Keyhole Mode TIG Welding Process, *Metals* 2019.
6. **Costa, G., Resende, A.** (2020). Evaluation of the TIG–MIG/MAG welding process in direct polarity, *SN Applied Sciences* (2020) 2:164
7. **Aalaea, B., Abderrahmane, H., Gael, M.** (2016). Computational design of an automotive twist beam, *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 3, Issue 3, July 2016, Pages 215–225.



Elasto-Plastic Deformation of a Liquid Ammonia Storage Tank

Göksel Saraçoğlu¹

ABSTRACT

This paper presents the elasto-plastic deformation of the inner bottom plate of a 10,000 tonnes capacity double wall liquid ammonia storage tank used in a chemical fertilizer plant. It has been determined that the problem encountered in the bottom plate of the tank where the raw material is stocked at -33°C is caused by the rapid cooling of the tank after the internal maintenance. Mechanical tests performed on the sample cut from the bottom plate showed that the plastic deformation occurred at a rate of 1.94%, but the toughness was at a level that did not require a change. Therefore, it is foreseen that the use of the bottom plate can be continued by complying with the 1°C/hour heating and cooling rule in accordance with the relevant standard API-620.

Keywords: Elasto-plastic deformation, liquid ammonia tank, the Bauschinger effect, low pressure tank, rapid heating and cooling

Bir Sıvı Amonyak Depolama Tankının Elasto-Plastik Deformasyonu

ÖZ

Bu çalışma, bir kimyasal gübre fabrikasında kullanılan 10.000 ton kapasiteli çift cidarlı sıvı amonyak depolama tankının iç taban sacının elasto-plastik deformasyonunu sunmaktadır. Hammaddenin -33°C'de stoklandığı tankın taban sacında karşılaşılan problemin, tankın bir önceki iç bakım sonrası hızlı soğumaya maruz bırakılmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Taban sacından kesilen numune üzerinde yapılan mekanik testler, plastik deformasyonun %1,94 oranında gerçekleştiğini ancak tokluğun değişiklik gerektirmeyen bir seviyede olduğunu göstermiştir. Bu nedenle ilgili standart API-620'nin belirttiği 1°C/saat ısıtma ve soğutma kuralına uyularak mevcut taban sacının kullanımına devam edilebileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elasto-plastik deformasyon, amonyak tankı, Bauschinger etkisi, düşük basınçlı tank, hızlı ısıtma ve soğutma

Geliş/Received : 24.04.2022
Kabul/Accepted : 02.07.2022

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Bakım ve Onarım Bölümü, İskenderun Hatay
goksel.saracoglu@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0211-0540



1. INTRODUCTION

Liquid ammonia is used as an input in many production facilities, especially in chemical fertilizer production facilities. The storage of the product, which performs the liquid-gas conversion at -33°C under normal conditions, differs from hydrocarbon storage in terms of low temperature, pressure and product emission harms to health, safety and the environment. Therefore, some Standards have been established specifically for the material, manufacture and operation of the storage tank [1-3].

The tank is insulated to prevent intense evaporation due to heat transfer in the liquid ammonia stored in the tank at -33°C . Some tanks have a single wall and insulation is formed on the outer surface of the wall. As in the tank considered in this study, some tanks are double-walled and the insulation is between two walls (shells). In the tank, ammonia vapor is formed on the liquid ammonia and this vapor is sucked from the tank and sent to the cooling cycle facility and condensed again and injected into the roof of the tank. The condensed product injected inside provides heat withdrawal from the internal environment of the tank.

Another issue that will threaten low temperature and cryogenic tanks is the frequency of in-tank inspections performed on hydrocarbon tanks. No matter how suitable the materials used are, more frequent internal inspections of the tank can lead to stress corrosion cracking. The European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA) stated the insidious danger in its publications and emphasized that internal controls should be carried out in a period to be determined in accordance with the risk assessment of tanks [4].

It can be stated that the thermal cycle will be more dangerous than being constantly at low temperature. Internal control of the tank means the incorporation of atmospheric oxygen into the tank. The lower flammable limit of oxygen in the tank for ammonia is 16%. In addition to stress corrosion cracking, not using inert gas (e.g., nitrogen) in the charging and discharging of the tank also brings with it the negativities that may result in the explosion of the tank [5].

The negative situation to be experienced in the chemical process industry brings with it difficult questions such as where the product will be unloaded from the tank, how it will be evacuated, what measures should be taken to prevent the production from being interrupted, and with what budget the repair of the tank will be made. There have been many disasters and undesirable situations caused by not paying attention to the specified aspects of ammonia storage tanks [6-10].

In the literature, it has been determined that the plastic deformation of the storage tank operating at low temperature due to thermal cycling or rapid filling has not been adequately examined. A method is presented for the analysis of the base plates in cylindrical liquid-storage tanks that are uplifted under the overturning influence of the

hydrodynamic wall pressures induced by earthquakes [11]. It is foreseen that the study can fill the gap in this field.

This paper presents the elasto-plastic deformation of the inner bottom plate of a 10,000 tonnes capacity double wall liquid ammonia storage tank used in a chemical fertilizer plant. It has been determined that the problem encountered in the bottom plate of the tank where the raw material is stored at -33°C is caused by the rapid cooling of the tank after the internal maintenance. Mechanical tests was performed on the sample cut from the bottom plate and the toughness was measured at a level that did not require a change. Therefore, it is foreseen that the use of the bottom plate can be continued by complying with the $1^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ heating and cooling rule in accordance with the relevant standard API-620.

2. CONSTRUCTION AND HISTORY OF THE TANK UNDER INVESTIGATION

The liquid ammonia storage tank investigated in this paper is a double-walled and bot-

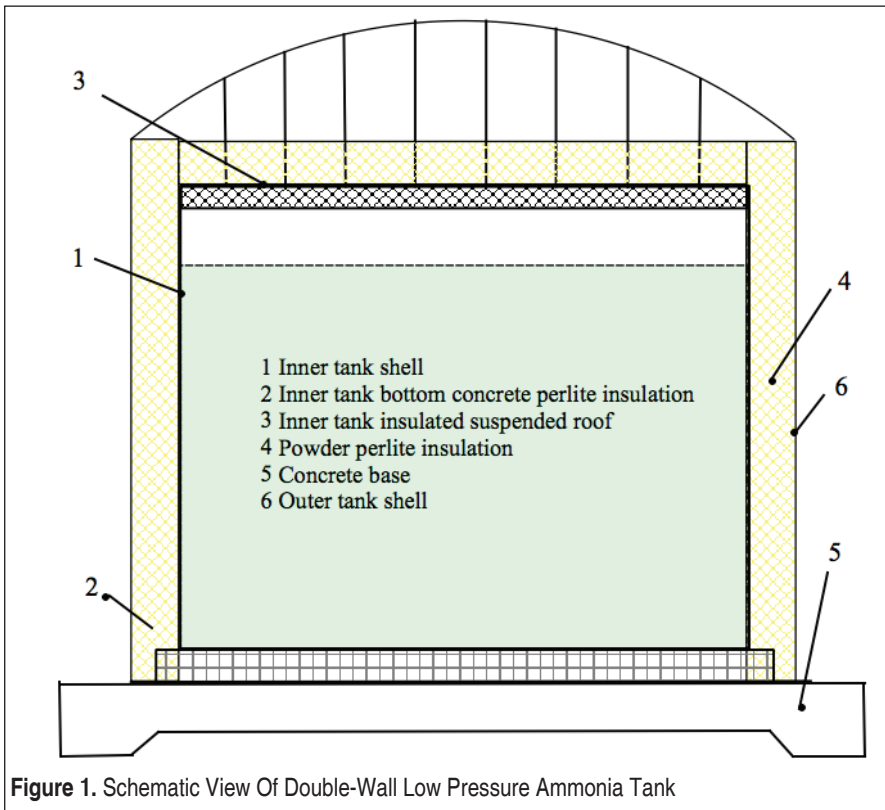


Figure 1. Schematic View Of Double-Wall Low Pressure Ammonia Tank



tomed tank with a 10,000 tonnes capacity, constructed according to API Standard 620 and 650 [1, 12] and in which anhydrous liquid ammonia at -33°C is stored (Figure 1). Perlite-based insulation materials are used to maintain the temperature of the product between the two tanks.

In this construction type, both the inner and outer tanks are capable of containing the refrigerated liquid stored independently. The inner tank contains the refrigerated liquid under normal operating conditions. The roof is supported by the outer tank. The outer tank is capable of containing both the refrigerated liquid and the vapor resulting from product leakage and is located between 1-2 meters from the inner tank. In such tanks, secondary containment in the form of dyke wall is not required. The double containment tank design, also known as the “cup-in-tank” (double integrity) design is widely adopted for ammonia storage tanks. The inner cup of the tank is separated from the outside tank by a suspended deck resting on the top of the inner cup.

The present day tanks are constructed on elevated concrete foundations to avoid the problem of ice formation and propagation in the soil below [13, 14].

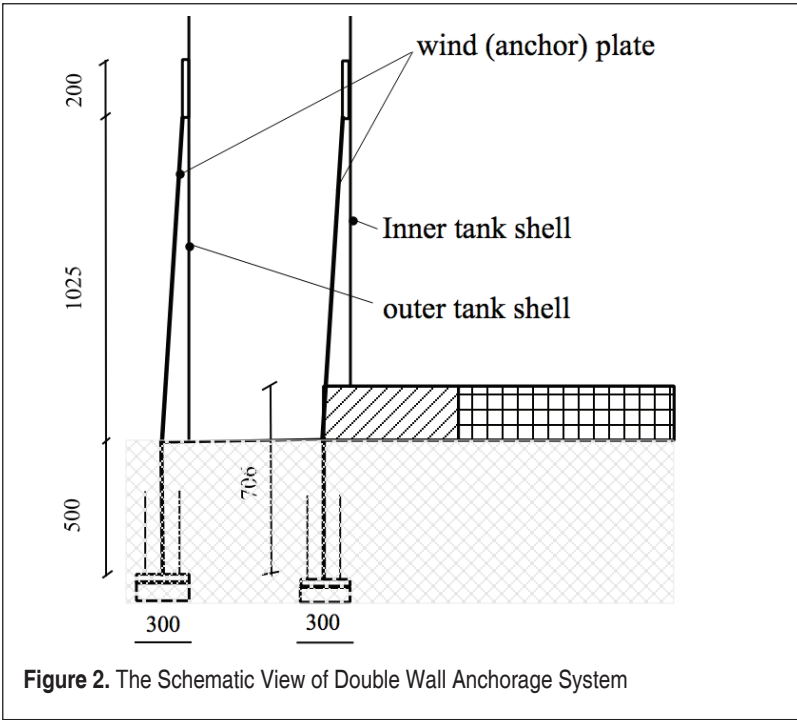
The bottom plate in question is made of pressure vessel steel (ASTM A516 Gr 60) with a thickness of 6 mm and a minimum operating temperature of -40°C . The rigidity of the tank has been increased in accordance with the API Standard 650 by using 8 mm thick plates (annular plate) of the same material in the parts of the bottom plate area close to the wall. The first shell plates of the inner and outer tanks are constraint by wind beams which is anchored to the ground and press the shell plate with the spring force (Figure 2).

A pressure vessel steel (ASTM A 516 Gr 70) with a minimum operating temperature of -40°C is used in the shell of the inner tank. Shell plates thins out in accordance with the API Standard 650 when the upper level is reached.

The disadvantages that may threaten the structure in such tanks operated under cryogenic conditions can be listed as follows [4]:

- a) While the tank is in operation, the presence of oxygen to enter will cause stress corrosion cracking,
- b) The deformation that will occur in the face of sudden heating and cooling of the tank exceeds the elastic limit.

It is recommended to sweep the ammonia tanks with a neutral gas (nitrogen gas) in order to prevent the presence of oxygen of air in the ammonia tanks and therefore the stress corrosion cracking, as well as to prevent the risk of explosion and the mixing of ammonia with air at dangerous rates. When the service and maintenance history of the ammonia tank is examined, it has been determined that there is no record of whether neutral gas was used or not when it was first commissioned. Nitrogen gas was also not

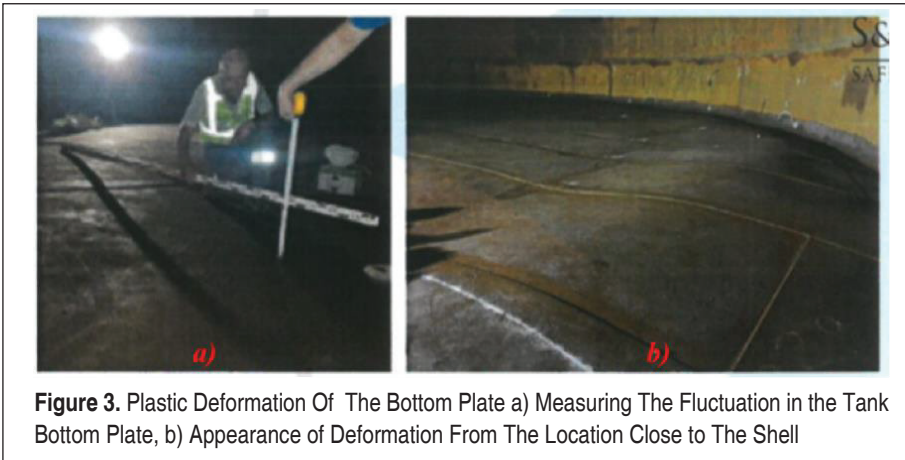


used in the first inspection, but in the second inspection, it was used in the process of scavenging the air or ammonia gas.

The second criterion that threatens the tank is the permanent elongation of the tank material above its yield strength. This issue is not related only to the use of steel materials of appropriate structure, but also to reducing the tank to the regime temperature or bringing it to ambient temperature at a certain speed. API Standard 620 and 653 Codes recommend heating or cooling tanks at $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ [15].

The first internal control and maintenance of the tank was carried out approximately 18 years after its commissioning. In this control, no negative situation was encountered inside the tank. In accordance with the Occupational Health and Safety Law, a Risk Based Analysis (RBI) study was carried out under the advice and assessment drawn by the European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA), and it was decided to carry out internal inspections for 15-year periods [4]. As a result of these studies, the second internal inspection of the tank was planned and carried out 33 years after its commissioning.

In the second inspection, unlike the first, fluctuations up to 240 mm in height were detected in the bottom plate of the inner tank with a diameter of 29,650 mm (Figure 3 and 4a).



Considering the API Standard 653, the values in Table 1 were encountered when the heights of the wavy form of bottom plate were measured within a systematic as seen in Figure 4b.

First of all, the amount of plastic deformation was evaluated of the bottom plate of the inner tank according to Annex B-2 of the API-653 Code [15]. Accordingly, the maximum collapse value at the bottom of the tank was measured as 28 mm, the highest bulge value as 265 mm, and it was stated that it exceeded the limit value of 62 mm calculated according to the relevant Code.

In this case, a preliminary report was issued that the tank bottom plate cannot be used and the tank needs to undergo a rehabilitation.

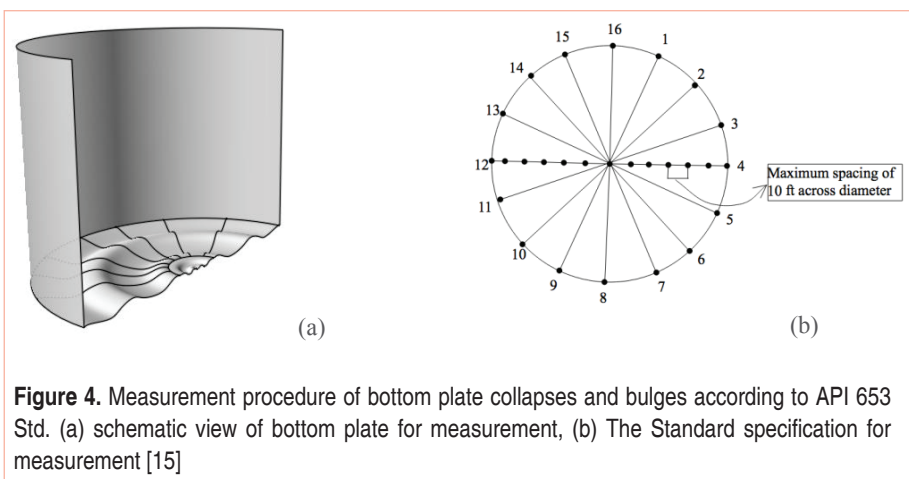
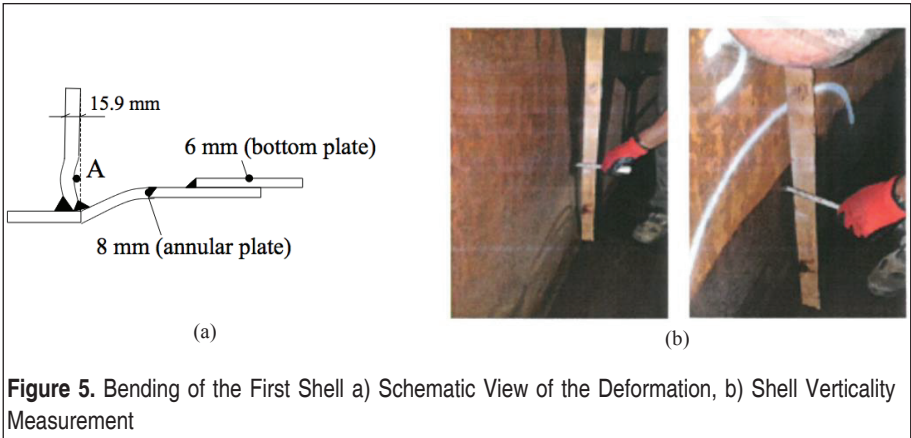


Table 1. Bottom Plate Collapse Depth and Bulge Height Values (all collapses and the bulges above 50 mm are colored)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
14812	0	9	11	4	14	8	16	15	18	0	8	3	2	-3	-1	-11
13812	51	63	77	-1	104	119	105	141	130	168	135	136	60	132	127	56
12812	34	56	147	-15	163	174	155	198	189	214	240	210	171	214	213	122
11812	-6	2	136	14	87	110	170	104	202	124	164	246	246	265	229	171
10812	86	66	65	60	2	28	51	30	92	32	79	190	190	198	196	172
9812	151	149	1	0	-5	0	2	9	2	-8	7	63	83	83	216	183
8812	75	41	-7	15	27	18	0	1	8	8	3	14	20	23	177	210
7812	2	-11	-10	27	29	15	22	5	-2	17	12	-6	-9	13	35	108
6812	-6	-7	-8	-9	-4	24	11	-5	-9	6	9	6	-9	32	-8	-7
5812	-6	-14	-13	-4	-3	24	6	0	-6	13	0	26	-6	21	12	-18
4812	5	-28	-2	-6	17	-1	10	22	-4	33	22	2	21	16	23	-5
3812	5	-25	1	-13	4	-14	-4	5	-1	20	27	-15	8	6	4	0
2812	-15	-20	-13	-8	1	-7	-1	-10	11	-1	6	-5	28	32	25	15
1812	-13	-16	1	10	8	17	8	9	21	14	6	26	21	9	11	9
812	-4	-5	-6	-5	-3	-3	-3	-6	6	10	8	8	4	1	-10	-3
0	-3	-4	-10	-1	-10	-1	-7	2	6	-2	6	-1	-2	2	0	-2



Another important result obtained from the field studies was that the inner tank (first) shell lost its verticality by bending (Figure 5). In the relevant (preliminary) report, it was reported that dishing occurred at the lowest level of 20 mm and the highest level of 38 mm during the verticality control along the tank perimeter, and it was stated that it was not suitable because it exceeded the limit level of 13 mm according to the API Standard 650 [12].

3. TAKING THE PRODUCT INTO THE EMPTY TANK

The bottom plate cannot compensate itself after the product is taken into the tank or product is withdrawn from the tank rapidly, and it undergoes plastic deformation by exceeding the elastic limits. During the instant product intake into the tank, the shell, which is approximately three times larger than the bottom plate in surface, cannot cool



sufficiently. However, in this situation, the bottom plate will be wet by the product and needs to shrink. The shell of the tank will resist this need and the bottom plate undergoes elasto-plastic deformation by exceeding the yield stress. The biggest issue affecting the structural strength of low temperature and cryogenic tanks is the speed of product intake.

The inner bottom diameter of the anhydrous ammonia tank is 29,634 mm. This length is the distance (diameter) between the inner surfaces of the first shell. In the part of this area adjacent to the inner shell, there is an 8 mm thick annular plate around the perimeter. Its width is 662 mm from the inner face of the first shell. The diameter of the 6 mm thick base is 28,310 mm (Figure 6).

The technical specification of ASTM A516-60, which is the material of the bottom plate, is presented in Table 2.

Table 2. Bottom Plate (ASTM A516-60) Material Properties [16]

Features	Value	Unit
Tensile strength	415	MPa
Yield strength	220	MPa
Allowable stress (-33°C)	118	MPa
Thermal expansion (α)	$12.3 \cdot 10^{-6}$	$1/^\circ\text{C}$
Modulus of elasticity (E)	200	GPa

Consider a strip from the bottom plate of the inner tank which has a diameter length but 1 mm width. Since the inner tank bottom plate is 6 mm thick in the middle and 8 mm thick at annular region, this strip will also have the same geometric feature. The cross-sectional area of this strip will be $A_1=6 \text{ mm}^2$ between the annular plate and $A_2=8 \text{ mm}^2$ at annular plate. Assume that the product is taken at low speed when all the internal surface of the tank is at about 30°C in the empty condition. After being put into service, this temperature will decrease to -33°C , creating a temperature difference of 63°C . In such a case, the amount of contraction corresponding to this temperature difference would be 23 mm according to Eq. 1.

$$\delta = \alpha(\Delta T)L \quad (1)$$

The (common) force to restore this thermal contraction will be 0.0244 P as a result of Eq. 2. The lengths of the (each) 8 mm thick part (L_1) and the length (L_2) of 6 mm thick part of the strip are 668 mm and 28310 mm, respectively.

$$\delta = \frac{PL_1}{A_1E} + \frac{PL_2}{A_2E} + \frac{PL_1}{A_1E} \quad (2)$$

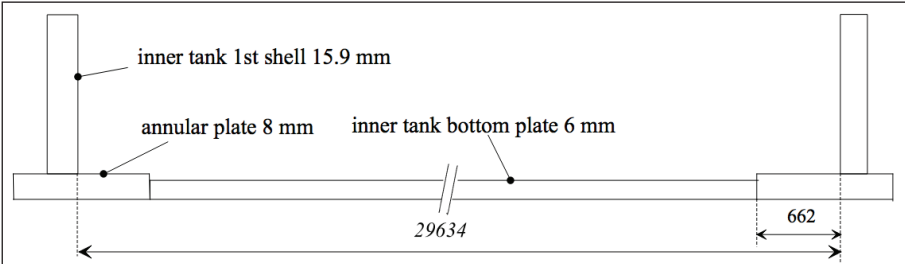


Figure 6. The Schematic Section of Inner Tank

This imaginary strip will not be contracted due to the restraint of the first shell, despite the temperature difference of 63°C . So, Eq. 1 and 2 will be equal to each other. In this case, the force P will be 943 N. The principal stress that will occur in strip sections of 6 and 8 mm thickness will be 157 MPa and 118 MPa, respectively.

When it was desired to verify the obtained values with the non-linear analysis of finite elements method, the close results were obtained as seen in Figure 7 if singularity values are filtered.

As a result of this calculation, it is seen that the stresses occurring in the bottom and the annular plate are different. These stresses are the maximum principal stresses occurring at the entire circumference of the tank. These stress values are emerging when the product-intake begins and only the bottom is wet by product and does not rise too

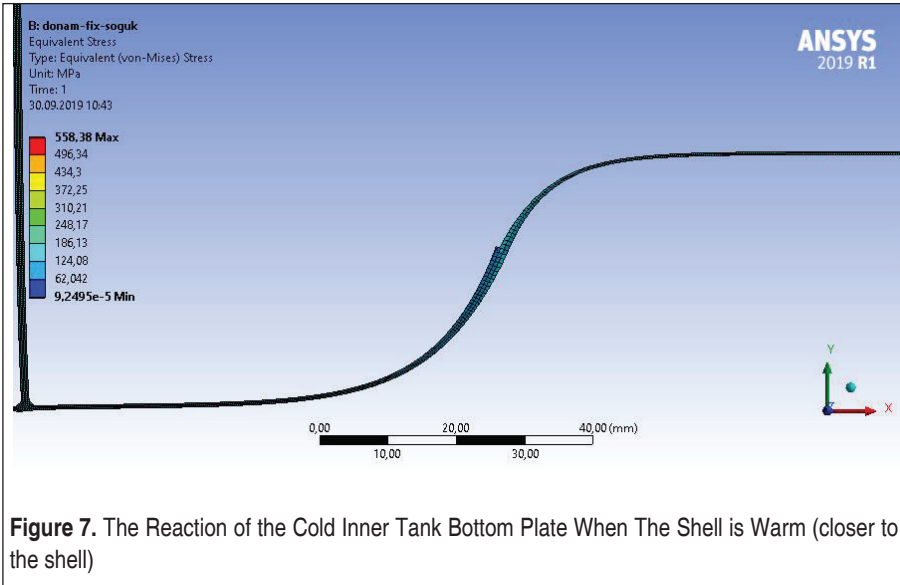
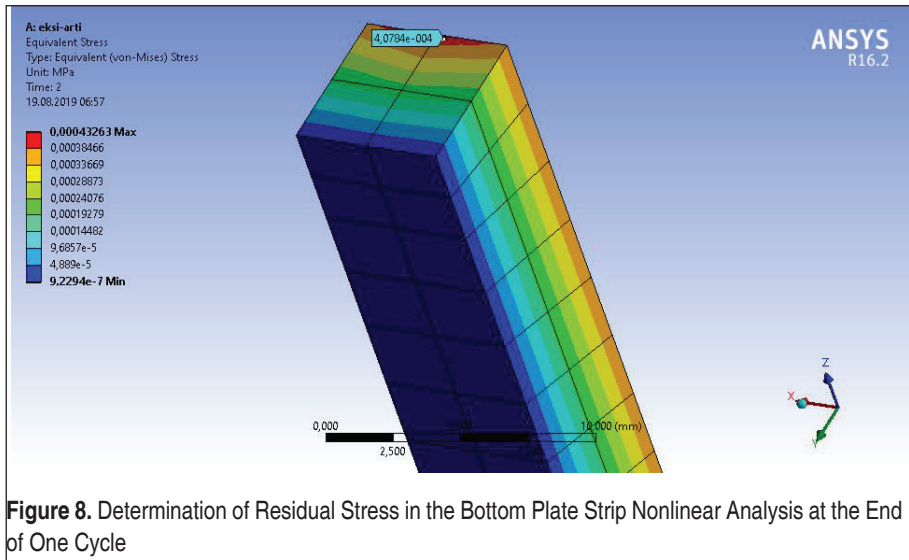


Figure 7. The Reaction of the Cold Inner Tank Bottom Plate When The Shell is Warm (closer to the shell)



much at the wall (shell) level. The 157 MPa principal stress encountered in the 6 mm thick bottom plate or the 190 MPa obtained in terms of the von Mises stress is below the level that will cause plastic deformation, considering that the yield strength is 220 MPa.

When there was no product in the tank, non-linear analysis was performed, in which the temperature of the tank bottom plate was reduced from ambient temperature to -33°C and then brought back to ambient temperature, it was observed that plastic deformation did not occur (Figure 8). In the figure, it is seen that there is no significant residual stress in the bottom plate strip, and the stress is decreasing from the upper (product) surface of the plate to the lower surface.

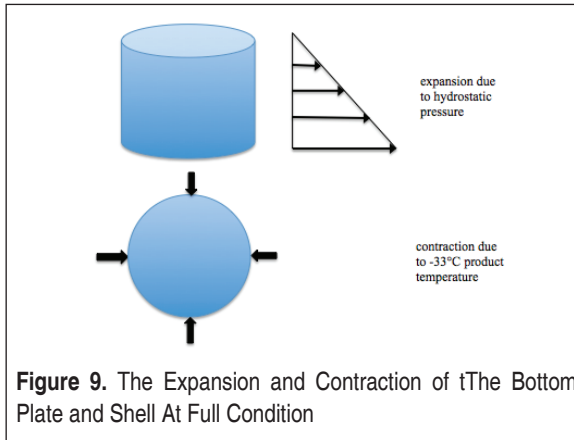
4. THE FULL CONDITION OF THE TANK

Consider that the product is taken to the tank as specified by the Code and the tank reaches a full state (Figure 9). In this case, besides the hydrostatic pressure at the bottom of the tank and the first shell, the contraction movement of the shell will be completed.

The tank is operating at approximately 127 mbarg. If the pressure exerted by the weight of the product on the tank bottom plate, the pressure is found as 2.5 atm (0.25 MPa) as a result of Eq. 3:

$$P = P_0 + \rho gh \quad (3)$$

The stress exerted by the hydrostatic pressure on the shell causes Hoop's or meridional



stress. The stress also causes the change in diameter. According to API Standard 653, the pressure applied to the shell near the bottom plate is calculated as 126 MPa using Eq. 4. Here, D is the diameter of the tank in feet, H is the height of the product in feet, G is the specific gravity of the product (0.68), and t is the wall thickness of the first shell in inches.

$$P = \frac{2.6 DGH}{t} \quad (4)$$

The pressure found tries to expand the diameter of the tank at a height of approximately 300 mm from the bottom of the tank when the tank is full. As can be seen from the calculation below, the nominal diameter of the tank, which is 29,650 mm, increases by 18 mm as a result of Eq. 5:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (5)$$

When the tank is full with the product at a temperature of -33°C , the thermal shrinkage of the bottom plate is balanced with the shrinkage of the shell. But, the shell of the tank is also exposed to hydrostatic pressure. The diameter of the tank will increase by $\delta=0.024P=18$ mm. An increase of 18 mm in diameter induces a stress of 123 MPa and 92 MPa in the bottom and annular plate, respectively. In Figure 10, it can be seen that there is little stress difference in the strip between the near shell and the center of the tank, and it is higher in the central part.

The stresses encountered are below the yield stress when the tank is at full condition. As a result of the non-linear analysis based on this state, it is seen that the von Mises stress gives a result close to the calculated value as seen in Figure 10.

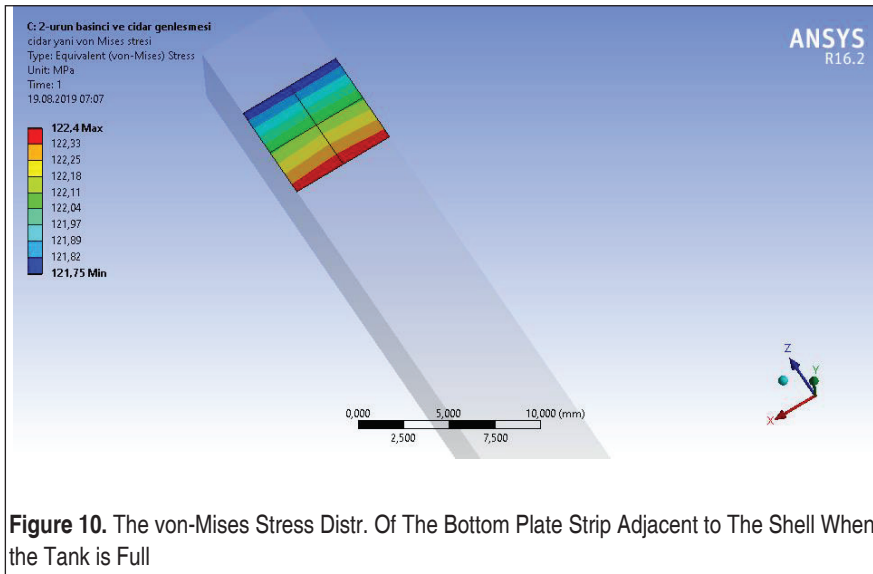


Figure 10. The von-Mises Stress Distr. Of The Bottom Plate Strip Adjacent to The Shell When the Tank is Full

5. THE HALF-FULL TANK SITUATION IN WHICH THE PRODUCT IS TAKEN QUICKLY

The plastic deformation problem encountered originates from the stress when the tank is at intermediate levels or full condition but the temperature regime has not been reached. In the tank, the surface area of the inner shell is approximately three times the inner bottom plate area. Although the shell thickness varies along the height of the tank, it has an average thickness of 10.4 mm and is approximately 1.72 times the thickness of the bottom plate. Considering the insulation loss, it is not easy to reduce the surface temperature of the shell plate. The cooling of the shell is approximately six times slower than that of the bottom plate. When the bottom plate surface temperature drops by 60°C, the temperature of the shell surface will drop by 10°C.

Consider the situation that the 1/3 of the tank is filled quickly and the temperature of the shell drops from 30°C to 20°C. In this case, the tank will try to adapt to the aforementioned contraction of the bottom plate by cooling down of the shell by 10°C, but the hydrostatic pressure of approximately 10 m height liquid ammonia to the bottom-shell junction will also cause to expansion of the bottom plate. The contraction of the shell due to temperature drop by 10°C is calculated as 11.46 mm and the diameter is reduced by 4 mm to 29,646 mm. This will relieve the tank bottom plate and reduce the stress value. However, the hydrostatic pressure of 63 MPa created by the liquid ammonia at the bottom of the first shell increases the diameter by 10 mm. In this case, there will be a total increase of 6 mm. This stress expands the bottom plate 6 mm in diameter, which is trying to thermally shrink, now reaches the critical threshold of

1190 N load. The maximum principal stress that this load will create on the bottom and the annular plate will be 200 MPa and 150 MPa, respectively. As can be seen, the resulting stress of 200 MPa is quite close to the yield strength of 220 MPa.

It is possible to reach the following intermediate results from all this analytical work:

- When the tank is put into service at a slow level, there is no problem in the tank,
- When the tank is put into service quickly, the yield strength can be reached in the bottom plate. The plastic deformation of the bottom plate is due to the fact that the tank shell cannot reach a sufficient temperature regime.

6. EVALUATION OF THE FIELD FINDINGS

The fact that the bottom plate has a wavy structure at the end of plastic deformation can lead to some mistakes for the tank owners in the evaluation according to the Standard in the first place. The wavy structure of the bottom plate was evaluated as the 'bulges' specified in Annex B2 of the API Standard 653. Therefore, it was concluded that the bottom plate should be renewed as it exceeds the bulge limit specified by the Standard. But, bulge is a subject related the erosion of the insulation material under the bottom plate. The recess or bulge is dangerous when the tank is full because there is no contact between the floor (bottom) plate and the structure below it (Figure 11). However, there is no erosion problem in the sub-insulation structure of the tank in question and is related to the plastic deformation of the bottom plate.

The bottom plate consists of a number of plates that are overlap welded on each other. A limit of plastic deformation due to thermal stress is also specified in B4.2 of the Code. In the Code, it is stated that those that have undergone 2-3% plastic deformation should be replaced.

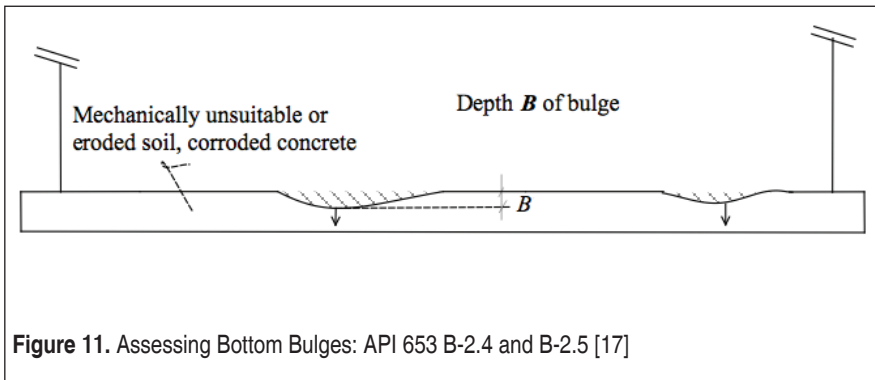


Figure 11. Assessing Bottom Bulges: API 653 B-2.4 and B-2.5 [17]



7. EVALUATION OF THE PLASTICALLY DEFORMED BOTTOM PLATE

Tensile and impact analysis were carried out by cutting a piece in the form of a 200 mm square from the bottom plate where the deformation occurred at the most. The chemical composition of the material was also determined. The yield strength of the plate was found as 358 MPa, and the average toughness value was found to be 66.7 J as a result of the impact test performed at -40°C. The patch plate placed on the cut is P265GH material in the Specification of EN10028-2 [18] and the mechanical feature of this material is presented in Table 3.

Table 3. Tank Bottom and Patch Plate Mechanical Test Results

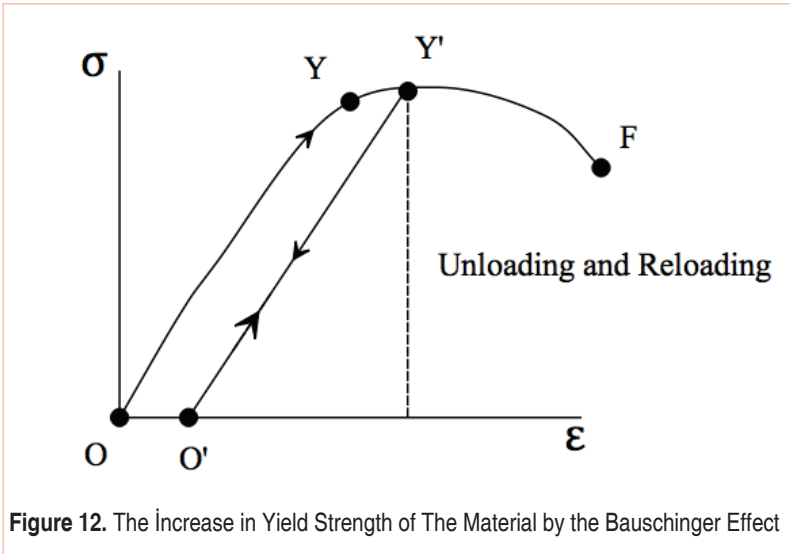
Sample	F_{\max} (kN)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Thickness (mm)	Toughness (J) (-40 °C)
Original bottom plate	61.4	512	358	30.6	5.99	66.7
Patch plate	56.9	474	292	29.7	6	59.3

It can be seen from the table that the bottom plate sample, which has been already undergone elasto-plastic deformation, has higher (toughness) values than P265GH patch plate. In terms of toughness, the relevant Code requires a minimum of 20 J impact strength of the material at -40°C. With its 66.7 J value, it is seen that there is no problem at this point. From the point of yield strength, it can be considered that a higher tough material than the material of the patch plate (P265GH) is used. When the projects of the tank are examined, bottom plate was constructed from ASTM A516 Gr 60 material quality and is equivalent to P265GH. Although ASTM states the yield strength as 220 MPa, it is determined that the yield strength is 265 MPa in the data of many manufacturers and in the P265GH material. In any case, the 358 MPa encountered is the yield value due to the Bauschinger effect and does not reflect the original yield value of the material.

8. THE BAUSCHINGER EFFECT

As seen in Figure 12, when a stress Y' above the yield stress Y is applied to a material and the stress is removed, the elastic stress path of this material under the stress will now be OYY' , the new yield strength Y' and plastic deformation OO' [19].

A material that has exceeded its yield strength or has undergone plastic deformation is not completely in an undesired condition. However, it should be noted that the area under the stress-strain curve gradually decreases as a result of plastic deformation. The curve follows the path $O'Y'$, and the area $OO'YY'$ is lost. The API-653 Code



requires the replacement of the relevant bottom plates in the case of an average of 2.5% plastic deformation. Assume that the yield strength of the bottom plate used in the tank is 265 MPa and a new yield strength of 358 MPa has been reached due to strain hardening, and in this case, the percentage of plastic deformation needs to be determined by using the Ramberg-Osgood criterion [20].

The stress-strain (strain) curve is consisting of the sum of the elastic and plastic regions. The elastic region has Hook's slope, while the plastic region can be found approximately by the Ramberg-Osgood criterion. The stress-strain relationship in the plastic region has the following exponential function (Eq.6). Here, ϵ_p , is the plastic elongation, H is the strength coefficient, and "n" is the strain hardening coefficient.

$$\sigma = H \epsilon_p^n \quad (6)$$

So, the total elongation is

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left[\frac{\sigma}{H} \right]^{1/n} \quad (8)$$

H and n in this equation can be found by using the Eq.9 and 10, which indicates tensile strength and yield strength σ_y , respectively:



$$n = \frac{\log (\sigma_{ult} / \sigma_y)}{\log (\varepsilon_f / 0.002)} \quad (9)$$

$$H = \frac{\sigma_y}{0.002^n} \quad (10)$$

In the equation, ε_f , shows the total elongation that occurs when the material breaks and can be found with the Eq.11:

$$\varepsilon_u = \varepsilon_f + \frac{\sigma}{E} \quad (11)$$

The stress, strain and modulus values of the tank bottom plate material are given in Table 4.

Table 4. The Stress, Strain and Modulus of The Tank Bottom Plate

Data	Value
σ_{ult}	512 MPa
σ_y	265 MPa
ε_u	0.3059 mm/mm
E	200 000 MPa

Based on these data, it is seen that the plastic elongation ε_f is 0.3034 mm/mm. The strain hardening coefficient “n” and the coefficient of strength H are calculated as 0.1312 and 598.9 MPa, respectively. After revealing these values, it can be concluded that the total elongation that occurs when the yield strength of 358 MPa is reached is 0.02117 mm/mm. When the elastic elongation is deducted from the total elongation, the plastic elongation amount of 0.01938 mm/mm is encountered. This figure shows us that if the material reaches a yield strength of 358 MPa, the plastic deformation is about 1.938 %. To be remembered, the API-653 Code was pointing to the rate of 2-3% to change. Considering the average of 2.5%, it shows that the encountered plastic deformation approached the limit and that it is necessary to be very careful especially when taking the first product (ammonia) into the tank.

Safety is very important. However, correct evaluation and economic approach are also important concepts. It would be an economical safe way to choose the plastic deformation analysis way instead of the B2 appendix of the Code in the evaluation of the plastic deformation at the bottom of the tank.

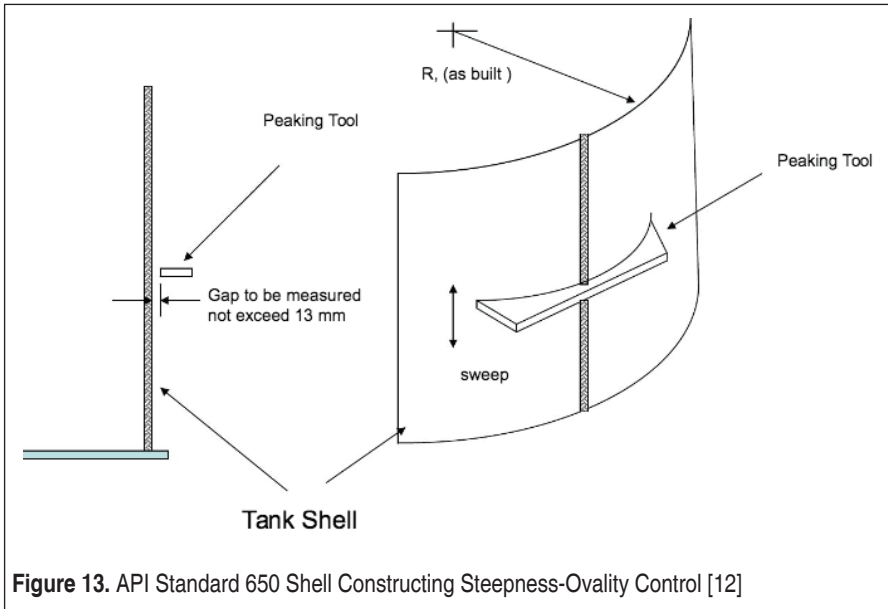


Figure 13. API Standard 650 Shell Constructing Steepness-Ovality Control [12]

When examining the verticality problem in the tank's shell, the steepness was thought as not suitable because it is more than 13 mm according to the API Standard 650 (Figure 13). But, in the standard, this issue is specified for the inspection of the shell that need to be bent according to the radius of the tank during construction. Hence, this issue was misunderstood. If there is a problem in the radius of curvature before the welding of the shell plates, it should be measured with the help of a gauge and if it exceeds $\frac{1}{2}$ inch, the spot welding should be removed, the sheet should be straightened and put back in place. There is no such situation in the tank, because the thermal movements of the shell and the bottom plate cannot be synchronized due to rapid product intake into the tank, and in addition, the anchor rods and wind beams around the outer perimeter of the shell prevent the bending.

The yield strength of A516-70 material is 37,700 Psi (260 MPa). When the tank is full of product, the stress at the lower part of the first shell is 126 MPa. The stress caused by the weights of the above shell plates on the first shell is at the level of 0.93 MPa. It does not seem possible that a situation such as buckling or bending can occur in the first shell, which is supported by anchorages from the outside, with careful use after this point.

The Occupational Health and Safety Law states that above-ground storage tanks where dangerous substances are stored should be checked every 10 years. If the design data of the ammonia tank is selected and maintained in accordance with the process and its external maintenance is fully carried out, there is actually no reason to enter it.



The more frequent internal maintenance is taken, the higher the probability of encountering undesirable situations. In terms of thermal stress, being constantly at -33°C is much better than bringing it from -33°C to ambient temperature. However, after all these observations in this case, it would be more safe approach to act according to the risk analysis directive published by EFMA [4] and to schedule the next maintenance date accordingly.

9. CONCLUDING REMARKS

The plastic deformation of the bottom plate of the tank and the deformation of the shell due to thermal shrinkage brought to mind that the tank should undergo a major repair in the first place. The failure of such important tanks in chemical plants causes the production of the plant to be interrupted. However, the root-cause analysis study and the calculations have shown that the tank can be used after this stage with careful use.

From here, it is possible to reach the following results:

- a. Cooling or heating the tank at $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ is important to avoid plastic deformation,
- b. properties. The material, which is completely plastically deformed, cannot fulfill its load-bearing function. This situation also showed itself in the hydrostatic pressure test performed with water at a height of 12 m during the maintenance, and no leakage was encountered. At the end of the hydrostatic test, it was also determined that the bottom plate was flattened to a large extent,
- c. Slow commissioning and use of the tank in accordance with the Code will increase the service life of the existing material,
- d. The percentage of plastic deformation in the tank was determined as 1.94%. It is a value that is close to the limit, but does not require a change,
- e. Occupational Health and Safety legislation requires that tanks where dangerous substances are stored be subject to internal control once every 10 years. However, importance is also attached to risk-based analysis. Instead of risk-based analysis, the internal control to be carried out once in 10 years will decrease the life of the tank and increase the maintenance costs. However, due to the delicate condition of the tank in this case, it may be more robust to think of the third maintenance after 10 years of the second one.

ACKNOWLEDGEMENT

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



REFERENCES

1. API Standard 620, Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, Twelfth Edition, Oct. 2013.
2. EN 14620, Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C - Part 1-5,
3. **Jeremić, L., Đorđević, B., Šapić, I., Sedmak, S.A., Milovanović, N.** Manufacturing and Integrity of Ammonia Storage Tanks, *Struct. Integ. and Life*, 20(2): 123-129, 2020.
4. Guidance For Inspection of Atmospheric, Refrigerated Ammonia Storage Tanks, European Fertilizer Manufacturers Association, Second Edition, Belgium, 2008 Edition, Issue 2014.
5. **Baboo, P.** Ammonia Storage Tank Pre -Commissioning. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019. <https://doi.org/10.17577/ijertv8is090209>
6. **Orooji, A., Hosseinina, S.S.** Lessons Learned From Decommissioning of a Liquid Ammonia Storage Tank, Asian Nitrogen + Syngas 2014 International Conference, Jakarta, Indonesia, 17 - 19 November 2014.
7. Benac, D.J., Cherolis, N.E., & Wood, D.F., Managing Cold Temperature and Brittle Fracture Hazards in Pressure Vessels. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16, 55-66, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11668-015-0052-3>
8. **Lonsdale, H.** in Ammonia Tank Failure, Ammonia Plant Safety AIChE, vol. 17. pp. 126-131, South Africa, 1975.
9. **Sweat, M.E.** An ammonia tank failure. A nuts-and-bolts account, covering the cause of failure, repair, and procedural changes made to prevent recurrence. *Plant/Oper. Prog.*, 2: 114-116, 1983. <https://doi.org/10.1002/prsb.720020210>
10. **Loginow, A.W.** A review of stress corrosion cracking of steel in liquefied ammonia service. *Materials Performance*, 25, 18-22, 1986.
11. **Malhotra, P.K., Veletsos, A.S.** Uplifting Analysis of Base Plates in Cylindrical Tanks. *Journal of Structural Engineering-asce*, 120, 3489-3505, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:12\(3489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:12(3489))
12. API Standard 650, Welded Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, March 2013.
13. **Lele, G.S.** Ammonia Storage: Selection & Safety Issues, *Chemical Industry Digest.*, May 2008.
14. **Al-Abdulally, F., Al-Shuwaib, S. and Gupta, B.L.** Hazard Analysis and Safety Considerations in Refrigerated Ammonia Storage Tanks, *Plant/Operations Progress*, Wiley Online Library, Vol. 6, Issue 2, p. 84-88, 1987. <https://doi.org/10.1002/prsb.720060209>



15. API Standard 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fifth Edition, November 2014.
16. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II-Materials, Part D- Properties, Table 1A, 2017 Edition.
17. **Matthews, C.** A Quick Guide to API 653 Certified Storage Tank Inspector Syllabus, Woodhead Publishing Limited, 2011.
18. EN10028-2:2017, Flat products made of steels for pressure purposes - Part 2: Non-alloy and alloy steels with specified elevated temperature properties.
19. **Lee, M., Barlat, F.** Modeling of Plastic Yielding, Anisotropic Flow, and the Bauschinger Effect, Material Science, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00219-3>
20. **Ramberg, W., Osgood, W. R.** Description of stress–strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC, 1943.

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ YAZIM ESASLARI

Mühendis ve Makina dergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından, ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın bilimsel, teknik ve mesleki konularda bilgi gereksinimlerini karşılamak, bilimsel ve teknik yönde gelişimlerine katkıda bulunmak üzere düzenli 3 aylık periyotlarla yayımlanan mesleki teknik bir yayın organıdır. "Mühendis ve Makina Dergisine" makina mühendisliği alanında aşağıda nitelikleri açıklanmış yazılar Türkçe ve İngilizce olarak kabul edilmektedir.

Araştırma Makalesi: Orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan yazılardır. Çalışmanın bilime katkısı olmalıdır.

Tarama Makalesi: Yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan yazılardır.

SUNUŞ FORMATI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalıdır.
2. Çizimler (şekiller) ve çizelgelerle (tablolar) birlikte, makaleler 25 sayfadan, kısa bildiriler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, Online Makale Yönetim Sistemi (OMYS) üzerinden gerekli kayıtlar oluşturularak gönderilmelidir. Yüklenen makale, "makale adının ilk 2 ya da 3 kelimesi" şeklinde adlandırılmalıdır. OMYS'ye yüklenen makalede yazar bilgileri bulunmamalı, yazar bilgileri için ayrıca bir kapak sayfası oluşturularak sisteme yüklenmelidir. Kapakta makale adı ve yazar iletişim bilgileri (adı soyadı, adresi, e-postası, yazara ait ORCID* bilgisi varsa akademik unvanı) yer almalıdır.
4. Metin yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık mümkün olduğunca kısa (en çok 100 harf) ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. İngilizce başlıktaki kelimeler ilk harfleri büyük ve gramer kurallarına uygun şekilde yazılmalıdır.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) abstract ve keywords (İngilizce başlık, öz ve anahtar kelimeler), (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. Öz (ve abstract) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç tane Türkçe ve İngilizce anahtar kelime verilmelidir. Türkçe ve İngilizce Başlık, Öz (abstract) ve anahtar kelimeler (keywords) birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralandırılmalıdır (TS 1212 ISO 2145).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sırayla (önce Latin alfabesi, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralandırılmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Fotoğraflar tarayıcıdan geçirilerek çözünürlüğü en az 300 dpi olacak şekilde ve jpeg formatında bilgisayar ortamına aktarılmalıdır. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli, numara ve başlıklar çizim (şekil) ve fotoğrafların altına, çizelgelerin (tablo) üstüne yazılmalıdır.

12. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.
13. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarasıyla kaynak belirtilmelidir.
14. Teşekkür metni olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.
15. Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde verilmiş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

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

Örnek 1: Kaçar, E. N., Erbay, L. B. 2013. "Isı Değiştiricilerin Tasarımına Bir Bakış," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 644, s.14-43.

Örnek 2: Kaçar, E. N., Erbay, L. B. 2013. "A Design Review For Heat Exchangers," Engineer and Machinery, vol. 54, no. 644, p.14-43.

Kaynak bir kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yayınlandığı yıl. kitabın adı, varsa cilt numarası, varsa editörü, yayın veya ISBN no, yayın evi, yayımlandığı yer.

Örnek: Lazzarin, R., Nalini, L. 2013. Havanın Nemlendirilmesi, ISBN: 978-605-01-0441-7, MMO/599, TMMOB MMO Yayını, İzmir.

Kaynak bildiri ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. “bildirinin adı,” konferansın adı, tarihi, yapıldığı yer.

Kaynak tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi. yıl. “tezin adı,” derecesi, sunulduğu kurum, şehir.

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

Kaynak internet adresi ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. “yazının adı,” internet bağlantısı, son erişim tarihi.

* Bilindiği üzere, araştırmacı, bilim insanı ve akademisyenlerin bilimsel çalışmalarındaki isim/kurum benzerliklerinden kaynaklanan bazı sorunların önüne geçilebilmesi amacıyla araştırmacı kimlik numaraları kullanılmaktadır. TÜBİTAK ULAKBİM ve YÖK arasındaki işbirliği ile yürütülen çalışmalar kapsamında, ORCID bilgisinin kullanılması karar verilmiştir. Bu bağlamda, makale yazarlarının uluslararası geçerliliği de bulunan “ORCID” bilgisine makalelerde yer verilmesi gerekmektedir. ORCID, Open Researcher ve Contributor ID’nin kısaltmasıdır. ORCID, Uluslararası Standart Ad Tanımlayıcı (ISNI) olarak da bilinen ISO Standardı (ISO 27729) ile uyumlu 16 haneli bir numaralı bir URL’dir. <http://orcid.org> adresinden bireysel ORCID için ücretsiz kayıt oluşturabilirsiniz.

YAYIN İLKELERİ

1. Yazıların telif hakkı devri, dergi internet sayfasında sunulan form doldurulup imzalanmak suretiyle alınır. İmzalı *Telif Hakkı Devir Formu*'nu göndermeyen yazarların yayınları değerlendirmeye alınmaz.
2. Yazılar, DergiPark sistemi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina> üzerinden alınmaktadır. Her yazı, konusuyla ilgili en az iki hakem tarafından değerlendirilir. Hakem görüşlerinde belirtilen eksikler yazarlar tarafından tamamlandıktan sonra, dergide yayımlanabilecek nitelikte olanlar belirlenir ve yazara bilgisi verilir. Dergide basıldığı haliyle makale içinde bulunabilecek hataların sorumluluğu yazarlara aittir.
3. Yazar isimleri hakemlere bildirilmediği gibi, yazar/lar/a yazının hangi hakemlere gönderildiği de hiç bir şekilde bildirilmez. Yayınlanmayan yazılar istenildiğinde hakem raporlarıyla birlikte hakem isimleri belirtilmeden yazar/lar/a geri gönderilir.
4. Yayın Kurulu hakemlerden gelen eleştiriler doğrultusunda yazının derginin bir başka bölümünde yayımlanmasının uygun olduğuna karar verebilir ve bu kararı yazar/lar/ın onayına sunar. Yazar/lar/ın da uygun görmesi durumunda, yazı önerilen bölümde yayımlanır.
5. Dergiye gönderilen yazıların 'Yazım Esasları'na uygun olması gerekir. Esaslara uygunluk göstermeyen yazılar değerlendirmeye alınmadan yeniden düzenlenmesi için yazar/lar/a iade edilir.
6. Yayımlanan yazılar için yazar/lar/a ve değerlendirme yapan hakemlere derginin o sayısından birer kopya gönderilir.
7. Verilen süre içinde kendisine gönderilen yazıyı değerlendirmeyen ve dergi yayınında aksamaya neden olan hakemin, Yazı Değerlendirme (Hakem) Kurulu üyeliği gözden geçirilir.
8. Yayın Kurulu, gerekli gördüğü durumlarda yeni Yazı Değerlendirme (Hakem) Kurulu üyeleri atayabilir.
9. Araştırma ve tarama makalelerindeki görüşler yazarına, çevirilerden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.
10. Yazılar başka süreli yayınlarda yayımlanmamış olmalıdır. Herhangi bir toplantıda tebliğ olarak sunulmuş veya sunulacak ise bu açık olarak belirtilmelidir.
11. Hakem değerlendirme raporuna katılmayan yazar makalesini geri çekme hakkına sahiptir. Ancak geri çekme gerekçesini yazılı olarak yayın kuruluna sunmalıdır.
12. Dergideki yazılardan kaynak göstererek alıntı yapılabilir.
13. Yazılar için telif ücreti ödenmemektedir.
14. Yazılar araştırma ve yayım etiğine uyumlu hazırlanmalıdır. Etik kurallara aykırı davranışlarda (uydurma, çarpıtma, aşırma, tekrar yayım, dilimleme, destekleyen kuruluşu belirtmeme, haksız yazarlık, kaynak göstermeme vb.) bulunulmamalıdır.
15. Makalenin konusu ile ilgili şartlar;

Makalenin konusu TMMOB Genel Kurul ve Yönetim Kurulu kararlarıyla TMMOB Makina Mühendisleri Odasına kayıtlı mühendislik disiplinlerinin çalışma alanı ile ilgili olmalıdır.

“Makina, Uçak, Havacılık, Uzay, Mekatronik, Sistem, İmalat, Üretim, Üretim Tekniği, Üretim Sistemleri, Otomotiv, Endüstriyel Tasarım, Enerji Sistemleri, Makina ve İmalat ile Raylı Sistemler Mühendisliği

ABOUT ENGINEER AND MACHINERY JOURNAL AND ITS WRITING PRINCIPLES

Engineer and Machinery Journal is a vocational and technical publication that is published on a quarterly basis and aims at providing our country's industry, society, and disciplines and colleagues who are members of Chamber with their scientific, technical and vocational knowledge needs, as well as to contribute to their scientific, and technical development. The English and Turkish articles on mechanical engineering field with the following qualities written in the format stated below are accepted to "Engineers and Machinery Journal".

Research Article: It must reflect an authentic research with its findings and results. The research must contribute to science.

Literature Review Article: They must review an adequate number of scientific articles, summarize and evaluate the subject according to current knowledge and technological level, and compare their findings before interpreting them.

PRESENTATION FORMAT

1. The whole article (text, tables, equations, drawings) must be typed and arranged on computer and delivered as ready for publication. The article must be written on an A4 (210x297 mm) paper, via Word MS, in 10 font size (heading must be in 15 font size) of Times New Roman with single space.
2. Articles including their drawings and tables must not exceed 25 pages and short papers must not exceed 4 pages.
3. Articles must be sent via registration on Online Article Management System (OMYS). The uploaded article must be named as "article_the first 2 or 3 words of the title of article". The articles uploaded on OMYS should not contain any information about the author. The information about the author must be presented in a separate cover page, which must be also uploaded on the system. The cover page must demonstrate the name of the article and contact information of the author (name, surname, address, e-mail, academic title if there is one).
4. The article must be written in a plain language and style. It must comply with the spelling rules of the language used; third-person singular and deponent verbs must be used, whereas; inverted sentences must not be employed.
5. The title of the article must be clear and as short as possible (100 characters to the maximum) and also reflect the content. The first letters of English titles must be in capitals and titles must be written according to grammatical rules.
6. Chapters must be arranged in the following order: (i) abstract and keywords (in Turkish), (ii) abstract ve keywords (in English), (iii) main text, (iv) symbols, (v) acknowledgment (if necessary), and (vi) references.
7. Abstract must briefly define the objective, scope, method, and results of the study and must not exceed 100 words. At least three English and Turkish keywords must be provided. The first page must include the title in both Turkish and English, the abstract, and keywords; the main text must start from the second page.
8. The titles of chapters and sub-chapters must be numbered (TS 1212 ISO 2145).
9. Symbols must be employed according to international use; each symbol must be defined at their first use

in the text; at the end of the article (before References), all symbols used must be listed in alphabetical order (Latin Alphabet first, Greek alphabet second).

10. Equations must be numbered and these numbers must be indicated in parentheses at the end of line.
11. Photographs must be scanned, and transferred to computers in jpeg format with a resolution of 300 dpi at least. Drawings, tables, and photographs must be integrated into the text; each of them must be given a number and title; numbers and titles must be written under drawings (figures) and photographs, and above tables.
12. Only SI units must be used in articles.
13. As required by ethical rules, citations must be presented in quotes and its reference must be demonstrated via a reference number.
14. Acknowledgments must be as brief as possible and state the people and institutions having contributed to the study.
15. References must be numbered via brackets in the text; in the list of references, they must be indicated according to their order in the text. The references must include the following information:

If reference is an article: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "full title of the article," name of the journal, volume, issue, start and end page.

If reference is a book: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year of publication. name of the book, volume number (if available), editor (if available), publication or ISBN no, publishing house, place of publication.

If reference is a paper: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the paper," name of the conference, date, place.

If reference is a thesis: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the thesis," degree, presented institution, city.

If reference is a report: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. name of the report, type of the report, publication number, name of the institution, place of publication.

If reference is a website: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the article," internet address, last date of access.day.month.year

PRINCIPLES OF PUBLICATION

1. The copyrights of articles are transferred by signing the form presented on the website of the journal. The articles of authors, who have not signed and sent the Form for Transfer of Copyrights, will not be taken into consideration.
2. Each article is sent to at least two arbitrators, who are experts in the subject of article. After authors revise their articles based on the suggestions of arbitrators, the ones that are deemed appropriate to be published on the journal are determined and authors are notified. The final version of articles are organized and sent by authors to the secretary of publication via dergipark. The errors that may be found in the article following its publication are the responsibility of the author.
3. Neither arbitrators are notified of the names of the authors, nor authors are notified of the names of arbitrators. The unpublished articles are sent back to authors with arbitration reports, upon author's request.
4. The Publication Committee may decide that the article be published in another section of the journal, based on the suggestions of arbitrators and may present their decision for the approval of author(s). If also deemed appropriate by author(s), the article is published on the presumed section.
5. The articles sent to the Journal must comply with the 'Principles of Writing'. The articles not complying with these principles will be returned to the author(s) for revision, without being evaluated.
6. A copy of the issue of the journal is sent to the authors of articles published in that issue and the arbitrators who evaluated those articles.
7. The membership to the Article Assessment Committee of the arbitrator, who have not evaluated the article within the due time and thereby caused delay in the publication of the journal, is reviewed.
8. The Publication Committee may appoint new members to the Article Assessment Committee, if/when they deem necessary.
9. The views stated in the research and literature review articles are the responsibility of the author, whereas; the consequences which may result from its translation are the responsibility of the translator.
10. The articles must be not published on any other periodical publications. It should be clearly stated if the articles were presented or are planned to be presented as a paper in any meeting.
11. The author(s), who do not agree with the report of the arbitrators, may withdraw his/her article. However, the author(s) must present the reason behind his/her withdrawal to the publication committee in a written manner.
12. It is allowed to cite the articles published in the journal as long as the source is stated.
13. A royalty (a fee for copyrights) is not paid for articles.
14. Articles must be written according to the ethics of scientific research and publication. Conducts against the ethical rules (fabrication, falsification, plagiarism, republication, salami slicing, excluding the supporting bodies of the work, undeserved authorship, excluding some/all references, etc.) must be avoided.
15. Conditions related to the subject of the article; The subject of the article should be related to the field of study of engineering disciplines registered in TMMOB Chamber of Mechanical Engineers with the decisions of TMMOB General Assembly and Board of Directors.

“Machinery, Aircraft, Aviation, Space, Mechatronics, System, Manufacturing, Production, Production Technique, Production Systems, Automotive, Industrial Design, Energy Systems, Machinery and Manufacturing and Rail Systems Engineering”

Please send your articles via the system at <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>, in order to minimize the costs and time loss, which may result from the process of sending articles and evaluation by arbitrators.

- Yol Kaynaklı Titreşimlerin Taşınan Ürün Üzerindeki Etkilerinin
Canlandırılması İçin Bir Test Ekipmanı Konseptinin Geliştirilmesi** 443
*Development of A Test Equipment Concept For Reviewing The Effects of Road Generated
Vibrations on the Transported Product*
Serdar Murat DEMİREL
- İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Turbo Dizel Bir Havacılık Motorunun
Enerji, Ekserji ve Ekserjiekonomik Performansının Değerlendirilmesi** 473
*Energy, Exergy and Exergoeconomic Performance Assessments Of A Turbo Diesel
Aviation Engine Used On Unmanned Air Vehicles*
Özgür BALLI
- Metal ve Alaşımlarda Toplam Karbon (C) ve Toplam Kükürt (S) Tayini,
Metot Validasyonu ve Ölçüm Belirsizliği** 492
*Determination Of Total Carbon (C) and Total Sulfur (S) In Metals and Alloys, Method
Validation and Measurement Uncertainty*
Fatih TURAN, Sezai ŞEN, Caner TULGAR, Ziya ÇOBAN
- A Survey on Post-Weld Modification of Microstructural and Mechanical
Properties of GTAWed Aluminum Butt Joints Through FSP and T6
Heat Treatment** 511
*Tig Alın Kaynaklı Alüminyum Birleştirmelerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin
SKP ve T6 Isıl İşlemi Yoluyla Kaynak Sonrası Modifikasyonu Üzerine Bir Araştırma*
Gökçe Mehmet GENÇER, Coşkun YOLCU, Fatih KAHRAMAN
- Welding Order and Welding Penetration Levels' Impact on Product Life
Cycle For GMAW** 525
*Gaz Altı Ark Kaynağı Prosesinde Kaynak Sırası ve Kaynak Penetrasyon Seviyesinin
Ürün Ömrüne Etkileri*
Ceren BILGILI, Sibel UYGUN, Gizem YILMAZ
- Elasto-Plastic Deformation of a Liquid Ammonia Storage Tank** 540
Bir Sıvı Amonyak Depolama Tankının Elasto-Plastik Deformasyonu
Göksel SARAÇOĞLU