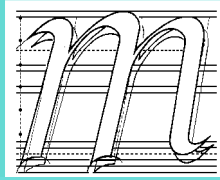


MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 21

Sayı: 2

Kasım 2023



m a t i m

**ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar
Eğitim ve Araştırma Vakfı - ANKARA**

Yayın Kurulu

Editör: Erhan İlhan Konukseven
Yardımcı Editör: Hakan Kalkan
Yardımcı Editör: Oğuzhan Yılmaz
Yardımcı Editör: Sezer Özerinç

ODTÜ
Atılım Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
ODTÜ

Kurul Üyeleri

Metin Akkök
Can Çoğun
Mustafa Bakkal
Cemal Merih Şengönül
Erhan Budak
İsmail Durgun
Volkan Esat
Mehmet Fırat
Hüseyin Filiz
Necdet Geren
Mustafa İ. Gökler
Yiğit Karpat
İsmail Lazoğlu
İzzet Özdemir
Ferruh Öztürk
Evren Yasa
İ. Ethem Saklakoğlu
Halim Meço
Yusuf Kaynak
Ali Oral
Haydar Livatyalı

ODTÜ
Çankaya Üniversitesi
İTÜ
Atılım Üniversitesi
Sabancı Üniversitesi
e- Danışman Bursa
ODTÜ Kuzey Kıbrıs
Sakarya Üniversitesi
Gaziantep Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
ODTÜ
Bilkent Üniversitesi
Koç Üniversitesi
İYTE
Uludağ Üniversitesi
Eskişehir
EGE Üniversitesi
FNSS
Marmara Üniversitesi
Balıkesir Üniversitesi
YTÜ

Danışma Kurulu

Bilgin KAFTANOĞLU
Tuna BALKAN
Melik DÖLEN
Yiğit YAZICIOĞLU
Orhan YILDIRIM

ATILIM Üniversitesi
ODTÜ
ODTÜ
ODTÜ
ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar
Eğitim ve Araştırma Vakfı

Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü 1661.Sk. No:12 Beytepe/Ankara

Tel : +90 312 227 02 73 , Faks : +90 312 227 02 75

Web : <https://parlar.org.tr/matim>

e-mail : matim@parlar.org.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 21 Sayı: 2

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 21 No: 2

ISSN 2667-4297

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfına aittir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

A Study on Endurance of Aluminum Road Wheels Produced by Flow Forming for Tracked Land Platforms 51

**S. Alper Kale
Faruk Elaldı**

Savunma Sanayiinde Katmanlı İmalat ile Tedarik Zinciri Yönetimi 63

Kıvılcım Ersoy

Yeni Bir Hibrid Metasezgisel Algoritma İle Drone Kolunun Yapısal Optimizasyonu 74

Betül S. Yıldız

Tornalanmış yüzey imgeleri gri ton ortalama değerlerinin takım aşınması ile ilişkisinin incelenmesi 81

**Muzaffer Tacettin Küllaç
Olkan Çuvalcı**

Kelebek Vanaların Simülasyon Destekli Deney Düzeneği Tasarımı ve Prototip Üretimi 89

Erhan Özkan

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimiz, 2017 yılından beri TÜBİTAK DERGİPARK ortamında yayınlanmaktadır. (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim>) 2019 yılından beri elektronik yayına dönmemiz nedeni ile dergi ISSN-No 2667-4297 olmuştur. Dergimizin eski sayılarına da (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim/archive>) adresinden ulaşılmaktadır.

Ayrıca yeni web sayfamızda (<https://parlar.org.tr/matim>) Dergimiz ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Dergimiz 2021 yılından beri tekrar TR Dizin tarafından da önceki yıllarda olduğu gibi taranmaya devam edilmiştir.

(<https://app.trdizin.gov.tr/dergi/TWpreE1RPT0/makina-tasarim-ve-imalat-dergisi>)

Dergimiz, 1986-2022 yılları arasında Makine Tasarım ve İmalat Derneği bünyesinde yayınlanmıştır. Ancak, Derneğin 2022 yılı sonu itibarı ile faaliyetlerini sonlandırması üzerine, dergimiz 2023 yılından itibaren Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı bünyesinde yayına devam etmektedir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

S. Alper Kale Baskent University
Department of Mechanical Engineering,
AnkaraFaruk Elaldi* Baskent University
Department of Mechanical Engineering,
Ankara**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 5 Aralık 2022

Kabul: 17 Mayıs 2023

*Sorumlu Yazar: Faruk Elaldi

Email: elaldi@baskent.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1214717>

A Study on Endurance of Aluminum Road Wheels Produced by Flow Forming for Tracked Land Platforms

Conventional road wheels for defense vehicles are generally produced by steel material easily and cheaply, but it brings extra, undesirable weight to the platforms. It is found that the use of aluminum for road wheels provides weight reduction on tracked land platforms. Generally, common manufacturing techniques for aluminum road wheels are casting and forging. These methods may not be suitable due to absorbing capability and cost perspective respectively. In this study, road wheels made of aluminum alloy material (2014-T6) produced by flow forming method as an alternative to steel is subjected to stress and fatigue analysis numerically and experimentally. It was concluded that flow forming production method of aluminum road wheel would be suitable to provide required low cycle fatigue life with advantageous of cheapness and lightness

Keywords: Flow forming, road wheel, tracked platform, finite element method, stress analysis, fatigue analysis

Atf şekli/How to cite: Kale S. A., Elaldi F., A Study on Endurance of Aluminum Road Wheels Produced by Flow Forming for Tracked Land Platforms. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(2): 51-62

INTRODUCTION

The performance of military vehicles on the battlefield can greatly affect the outcome of the war. Therefore, there are a number of important issues to be considered in military vehicles. One of these is to reduce the weight of military vehicles, which is a matter of considerable importance by military vehicle manufacturers [1, 2].

The road wheels are an important part of the military vehicles such as tanks and self-propelled howitzers and they are used in a lot of fields of defense land systems. In general, these road wheels are produced by steel alloy material due to its cheapness and availability. On the other hand, reduction of vehicle weight has vital importance in

the transportability and mobility of modern warfare equipment. Therefore, much effort is being expended to develop lightweight road wheels. Cast or forged aluminum with magnesium alloy road wheels are being used successfully by some tracked vehicles nowadays [3, 4, 5].

Definitely, there are significant properties of aluminum alloy wheels that they have low weight, high strength values, high toughness and high fatigue resistance. Generally, common manufacturing techniques for aluminum alloy road wheels are casting and forging [6]. Since load spectrum that each tracked vehicle road wheel experiences is considerably high and dynamic, casting may not be a good solution for manufacturing due to lower load absorbing capability of cast products. On the other

hand, forging might be a suitable method for dynamically loaded road wheels but, it is also expensive as well due to mold and final machining cost. Therefore, another method known as flow forming method was utilized for effective, cheap and lighter production in this study [5, 7, 8]. The military road wheels are generally subjected to different types of static, dynamic loads and impacts during their lifetime. Since these wheels are subjected to various fatigue loads, fatigue tests have great importance. So, main focus was put to see the effect of flow forming method on low cycle fatigue behavior of aluminum made road wheels [9-13].

In this study, the low-cycle fatigue behavior of the aluminum alloy road wheels produced by flow forming method using Al 2014-T6 material, considering the minimum and maximum compression loads experienced by a 47 tones tracked land platform on the road wheel, is investigated. Numerical and experimental fatigue analyses for only radial dynamic compression loads (excluding bending loads) were performed and the results together with the fatigue life data obtained by using the known S-N diagram of the material which is used Al 2014 - T6 is commented. Thus, it is intended to determine the fatigue safe life of each road wheel manufactured by flow forming method under specified loading conditions. In order to determine the fatigue safe life of the aluminum alloy road wheel (Al 2014 - T6) which has the same existing steel solid model geometry under the identical load spectrum, test coupons were cut and prepared for fatigue test from a prototype road wheels.

The main goal of this study is to investigate the low cycle fatigue life of aluminum 2014 - T6 road wheel which is manufactured by flow forming method for a 47 tones tracked armored vehicle and show the weight advantage of it by comparing with the steel equivalent road wheel.

Road Wheels

Military tracked vehicles can be moved by aid of the road wheels which are located at the bottom hull of the vehicle, see Figure 1. They are sometimes referred to as bogie wheels. Material itself and design criteria of road wheels affect significantly the abilities of tracked vehicles.

The number of the road wheels is determined according to total combat weight of the vehicle. When numbers of road wheels are calculated for a typical main battle tank, the total combat weight of main battle tank has to be considered. Since total weight is 47 tones, the design consists of six dual 26" road wheels on each side. If uniform load distribution is assumed, each dual wheel supports approximately

3,8 tones. However, the loading of the road wheels may not be uniform under static conditions due to the location of the center of gravity. [11]



Figure 1. Military Tracked Vehicle Road Wheels

When the number of road wheels is increased, suspension efficiency of the vehicle is decreased. Decreasing of efficiency may be outweighed by other advantages. There are two types of fundamental design concept in the diameter of the road wheel. Those are rolling resistance and power lost concepts as a result of the track link striking the ground. Some researches show that when the diameter of the road wheel is increased without changing its geometry, sinkage and rolling resistance are improved positively [11].

Generally, material of road wheels is steel and disk type of road wheels includes riveted or welded construction parts. On the other hand, cast or forged aluminum with magnesium alloy road wheels are also being used successfully by some tracked vehicles nowadays. The fatigue life of these materials can be provided by careful design, fabrication and surface treatment. [2, 12]

The aluminum alloy road wheel of the aforementioned land platform is manufactured by flow forming method which is also called spin forming. This manufacturing method is used in automobile road wheels mostly. Flow forming is a kind of sheet metal forming process. When circularly cut sheet metal is rotated around its radial axis, it is shaped by applying radial and axial force gradually on mandrel which is a kind of mold with the aid of rotating wheels. The advantages of flow forming method are material saving; close dimensional accuracy, low mold cost, high production quantities and hardening of materials. When flow forming method is used in production of road wheels, mechanical properties of road wheel such as strain hardening and fatigue strength increase considerably so road wheels can have higher bearing capacity. Considering these advantages, this process is chosen as the most suitable manufacturing method [5, 11].

MATERIAL SPECIFICATIONS

When density characteristic of steel and aluminum are compared to each other, aluminum has 2,7 g/cm³ and steel has 7,85 g/cm³. Therefore, there is approximately three times difference in weight between them, hence aluminum is preferred in this comparison due to lightweight characteristics. When high strength of aluminum alloys is combined with light weight characteristic, it allows to design and produce of strong and lightweight structures. Especially, this advantageous is effective for moving vehicles such as spacecraft, aircraft, and all types of land and watercraft vehicles [9].

Road wheel originally made by forged steel of a heavy tracked platform was manufactured by 2014 - T6 aluminum alloy material in this case. This material can be used easily for the applications that are requiring high strength and hardness. 2000 series aluminum alloys are effective in damage tolerance applications and also they have higher temperature working capability. It was reported in literature [11] that after T6 heat treatment, yield strength of road wheel was 380 MPa, tensile strength was 440 MPa and elongation was %10. These values were used as aluminum material properties in stress analysis with finite element method.

NUMERICAL ANALYSIS

Finite element model of road wheel was generated by using ANSYS 16.0 Workbench software which provides a solving method by finite element analysis more quickly and facilitates making a correct decision. Firstly, boundary conditions such

as forces, supports and friction coefficient were assigned to software to start analysis. Secondly, stress distribution of the total road wheel has been obtained. Therefore, the maximum stress for each loading case was determined by this stress distribution and so, maximum stress region of road wheel could be possible to be identified, as seen Figure 2. Afterwards, maximum and minimum loads to be applied for fatigue analysis were set for the region of test specimen on road wheel. Finally, the test specimens prepared in accordance with the ASTM standards were put into both experimental fatigue test and numerical fatigue analysis.

Finite Element Model and Mesh Structure

First step is to create a 3-D solid model to start finite element analysis. Therefore, three dimensional data of the road wheel which was supplied from manufacturer was used for creating this model for the analysis. The focus was put on the location indicated in Figure 2 from the outer side of road wheel which was determined by stress analysis.

Mesh structures are generated by using ANSYS Workbench software. The stresses in all elements are combined with various functions to determine the total stress. Finite element mesh structure includes three elements which are tetrahedral, prism and pyramid. In the analysis, 217,869 nodes and 121,342 elements were comprised for the road wheel, see Figure 3. On the other hand, for the specimens for fatigue test of road wheel, mesh structure was also generated and 5973 nodes and 3486 elements were used for each test specimen.

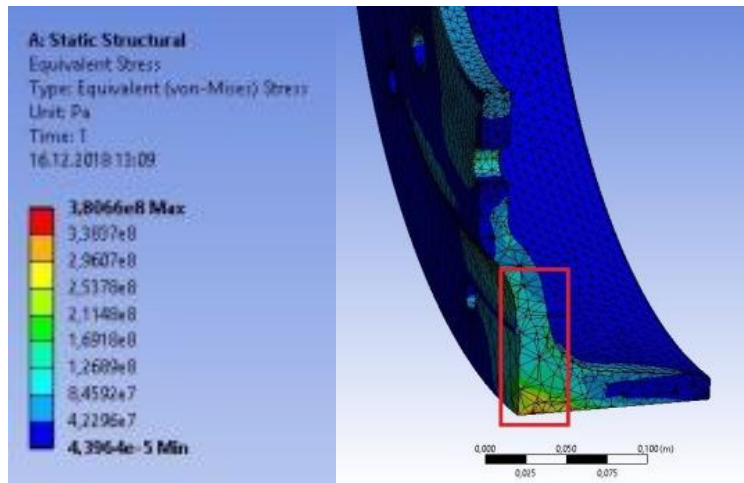


Figure 2. Maximum stress region of road wheel

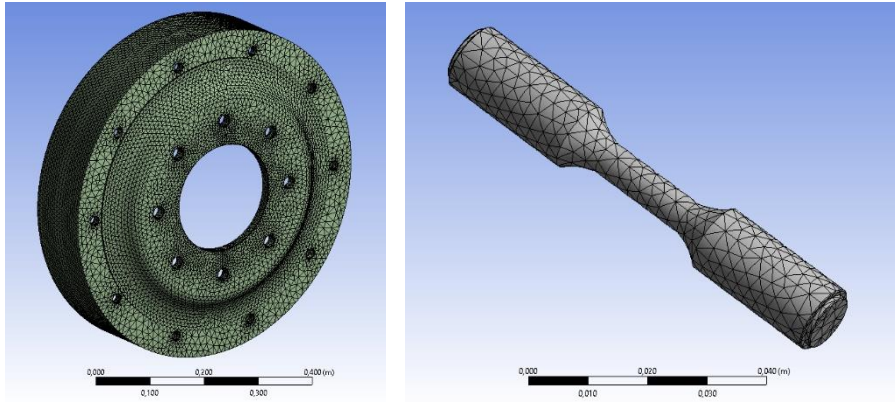


Figure 3. Mesh structure of the road wheel and test specimen

There are two contact regions which are central (axle of the road wheel) and ground surface. The loading forces are transmitted with the aid of these surfaces so there must be friction force to transmit loads to each other. Friction coefficient is determined from relationship between materials. Aluminum alloy road wheel is in contact with steel track at the ground surface and steel axle at the center of the road wheel. So, frictional coefficient between steel material (axle and track) and aluminum (road wheel) was selected as '0.61' which is valid for clean and dry surface [14].

In fact, tracks are vulcanized with natural rubber. In this study, the aim of using steel for contact surface instead of rubber is to create the worst case when there is any deformation in rubber, it may contact with steel track.

Another important point of finite element model is to determine the boundary conditions. Support points, loading conditions and temperature can be given as an example for boundary conditions. There are one fixed support, one applied force and two displacements in the analysis. These are shown in Figure 4. Fixed support of road wheel is shown as 'A' region determined as the place where road wheel and steel track contacted each other. Radial load is shown as 'B' region. Displacements as support points are shown as 'D' and 'C' regions in Figure 4. While these regions enable Y coordinate to be movable, they hinder the movement of X and Z coordinates. The reason for selecting such movement restrictions in analysis is to examine the effects of radial force on the road wheel correctly.

Aluminium road wheels are formed by flow forming (spin forming) method. Therefore, longitudinal un-notched forged fatigue data from

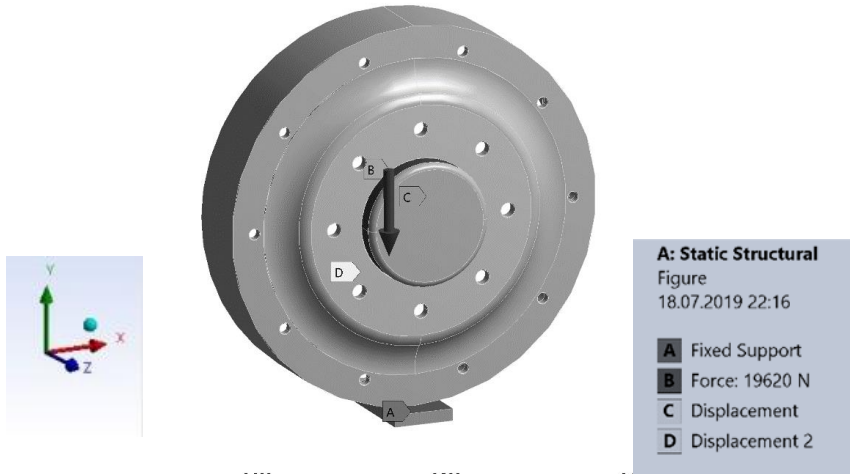
literature [6] which is shown in Table.1 were selected to use in finite element analysis and to calculate the fatigue life of aluminium road wheel. Relationship between alternating stress and fatigue life values of aluminium 2014 – T6 are indicated in Table.1 [9].

Road wheels may be exposed to various loads; they are called as radial, bending and torsion. Fatigue behaviour of road wheel can be changed by all types of forces. When the tracked land platform is maneuvered to right or left direction, it can be subjected to different torsion and bending forces. In this study, only the effect of radial force, which is the most important one, is investigated to analyse fatigue behaviour of road wheel. That is why, maximum and minimum radial forces affecting the road wheel and fatigue behaviour of road wheel were determined.

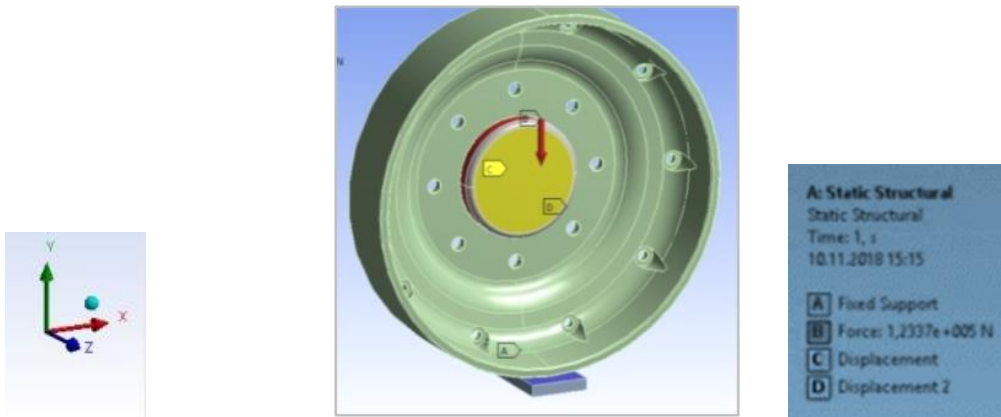
Equivalent stress, total deformation, maximum principal elastic strain and fatigue life were analysed for aluminium road wheel. Since the parts are exposed to variable loads, mean stress is considered in the calculation generally. Gerber Criteria was selected to make fatigue analysis of aluminium road wheel in this study since ductility is a featured mechanical property of the aluminium. Fatigue of road wheel test specimen was carried out by constant amplitude load.

Results of Finite Element Stress Analysis on Road Wheel

The Von – Mises yield criterion is used to determine equivalent stress on the aluminium road wheel in this study. The uniaxial radial load causes different types of stresses due to the geometry of the road wheel. The load which caused the plastic deformation on the road wheel was determined as the maximum load.



(a)



(b)

Figure 4. Boundary conditions of road wheel: (a) outside (b) inside

Table 1. Axial loading fatigue test data of hand forged 2014T6 aluminium alloy at stress ratio $A=\infty$ [12, 13]

Longitudinal Un-notched Specimen		
Specimen No	Alternating stress in \pm [MPa]	Cycles to rupture
A4L – 31	165,47	19,097,200
A4L – 14	172,36	14,268,800
A4L – 15	179,26	9,277,100
A4L – 25	179,26	7,910,100
A4L – 34	186,15	2,790,700
A4L – 33	193,00	469,300
A4L – 13	193,00	565,000
A4L – 23	220,63	473,900
A4L – 22	248,21	150,600
A4L – 35	248,21	108,100
A4L – 32	268,89	58,100
A4L – 12	289,57	53,500
A4L – 24	289,57	45,500

Stress analysis was used to predict fatigue life of aluminium road wheel in this study. A static analysis on the road wheel has been performed with using maximum load (23,400 Kg) which is the load at which permanent deformation has been first observed. A road wheel statically loaded up to a value of 23,400 Kg is shown in Figure 5. All other applied loads to road wheel to determine the maximum stress value in the region of the test sample and maximum stress values on the road wheel are shown in Table.2.

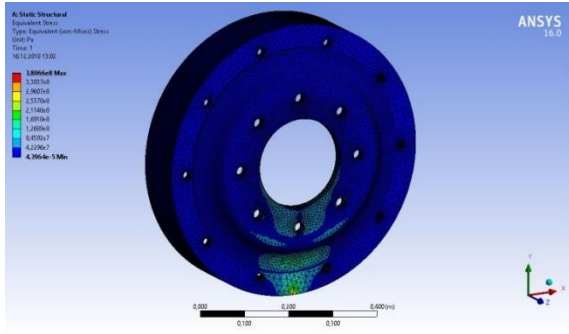


Figure 5. Equivalent stress (von-Mises) of aluminium road wheel

When stress analysis is performed at 2,000 Kg of minimum static loading applied to the road wheel, the maximum stress on the lower surface of road wheel is 56 MPa and by considering cross-sectional area, maximum stress on the test sample region is found to be 12 MPa. When 23,400 Kg of maximum static loading is applied to road wheel, maximum stress on the lower surface is going to be 380 MPa read from stress distribution and therefore maximum stress on the test sample region reaches 126 MPa. This value (380 MPa) corresponds to the point that the road wheel goes to permanent deformation. Since the test specimens could not be cut and machined from the lower surface of the road wheel where the maximum stress has occurred, it was gathered from the thickest of the road wheel which is the radially loading affected area.

When calculating the alternating stress to be used in fatigue analysis and test, it was clearly seen that the maximum stress developed on the test specimen region of road wheel has occurred very small comparatively. Assuming that the road wheel could be worked under much harder loading conditions so alternating stress has to be reconsidered based on these conditions. Therefore, maximum stress of alternating stresses should be determined according to 380 MPa of the yield strength of aluminium used. From this point of view, the maximum stress value to be used in fatigue analysis should be selected as close as possible to 380 MPa which is the starting point of the permanent

deformation of road wheel. So, it was decided to use 324 MPa as maximum stress value for fatigue analysis. On the other hand, minimum stress was selected as slightly over of the static load (2,000 Kg) that the road wheel would experience at the region that test specimen taken. Even tough minimum stress (56 MPa) has been reached at that region, the minimum stress to calculate alternating stress was conservatively preferred as 80 MPa. As a result, maximum stress and minimum stress was determined as 324 MPa and 80 MPa respectively for determination of alternating stress range of test specimen cut from road wheel.

When the stress distribution is examined, the stress range inside of the road wheel is seen in between 84 MPa and 126 MPa. Therefore, it was decided to take the test samples from the part of the road wheel indicated by a rectangular frame in Figure 2 since the highest radial stress value was also in this section.

Results of Finite Element Fatigue Analysis of Test Specimen

Considering 80 MPa and 324 MPa radial stresses and test coupon's dimensions according to ASTM E466/E606 standards, the maximum and minimum compression load to be applied for fatigue test samples needed to be recalculated. Consequently, the minimum compressive force was calculated for the 80 MPa and it was found as 210 Kg. and maximum compressive force was calculated for 324 MPa and determined as 850 Kg. The alternating stress which was applied at the fatigue test of test specimen was therefore calculated as 122 MPa.

When fatigue of test specimen was analysed between compression stresses of 80 MPa and 324 MPa, it was understood from the data given in Table 1 that almost infinite fatigue life between these loads exists since alternating stress of 122 MPa is well below 165,47 MPa which is corresponding to roughly 19 million cycles to rupture. No fatigue crack has been observed in the middle part of the test specimens on which 122 MPa alternating stress was applied.

EXPERIMENTAL

This experimentation includes experimental test setup, material specifications, fatigue testing and non-destructive test results of the specimens. In the present study, stress and fatigue analysis of aluminium alloy road wheel were carried out by using finite element analysis (FEA) method. Then, FEA results obtained were verified by using experimental results. Non-destructive methods were utilized to observe the difference between fatigued and non-fatigued parts.

Table 2. Calculated stress values by FEA for aluminium road wheel

Loadings [Kg]	Maximum stress values in the region of the test sample [MPa]	Maximum stress values on the road wheel [MPa]
2,000	12	56
4,000	31	95
6,000	45	135
8,000	58	175
10,000	70	211
12,000	81	245
14,000	91	275
16,000	100	302
18,000	108	325
20,000	115	346
22,000	122	366
23,400	126	380

Test Specimens and Test Setup

Test specimens of aluminium road wheel and test setup are explained in this section. First of all, the test specimens were cut from the outer side of road wheel and this location is indicated in Figure 6. The test specimens were manufactured according to ASTM E606 standards recommended for low-cycle fatigue specimens and also gripping adapters made by steel were manufactured to assemble the test specimens to fatigue test machine. The test specimens subjected to uniaxial forces were used to determine fatigue properties of nominally homogeneous aluminium materials.

Fatigue test was applied to three test specimens between 80 MPa and 324 MPa compression stresses under 10 Hz frequency with MTS Servo hydraulic test system (100 kN).

Testing

The specimens were connected to the hydraulic gripper of the test machine with the aid of steel adapters. The connection of test specimen with steel adapters is shown in Figure 7. Compression fatigue loading was applied to 3 number of test specimens. Since the maximum speed of a conventional tracked vehicle is known roughly 65 Km/h, the revolution of the road wheel is calculated at this rate of speed as 9 rev/sec. Therefore, frequency of fatigue test was selected roughly 10 Hz. Experimental fatigue test was limited to the number of cycles of 1,500,000. Limitation of cycles at fatigue test was due to time and cost factors. 122 MPa of alternating stress applied on the test specimen was calculated by the compression stresses between 80 MPa and 324 MPa.

Over the course of fatigue test, no damage was observed on the images taken from the samples every 250,000 cycles with the Nikon Shuttle Pix digital microscope. Totally, 6 images were taken per sample and cracks that may occur on the surface were not observed.

Non-destructive Test Methods of Specimens

Radiographic testing (RT): In radiographic testing operations, firstly, two different radiographic tests were applied to test specimens so there are two images obtained. Type of operation-1 was low duration. Type of operation-2 was more than 15 seconds from operation-1 and the parts were shot by rotating 90 degrees. ‘Y’ points out the ones that were exposed to fatigued test specimens, marked as Y1, Y2 and Y3. ‘S’ points out the ones that were exposed to non-fatigued parts, marked as S1, S2 and S3. The numbers below the parts are compatible with the fatigue test. Operation-1 is shown in Figure 8.

Liquid penetrant testing (PT): The test specimens which were exposed to fatigue loading were also examined by liquid penetrant testing. They are marked as Y1, Y2 and Y3 which are shown in Figure 9. Since no fatigue symptoms or cracks were observed in the fatigued parts, Non-fatigued test specimens were not examined by liquid penetrant testing.

Scanning electron microscope (SEM): There are several images taken for both separately fatigued test and non-fatigued test specimens in SEM analysis, see Figure 10 and Figure 11. In order to examine the surface of each fatigued test specimens, specimens were cut from mid-section and polished. When images that were taken from scanning electron microscope (SEM) were examined, it was found that no change in the grain size and not any discontinuity on fatigued and non-fatigued parts.

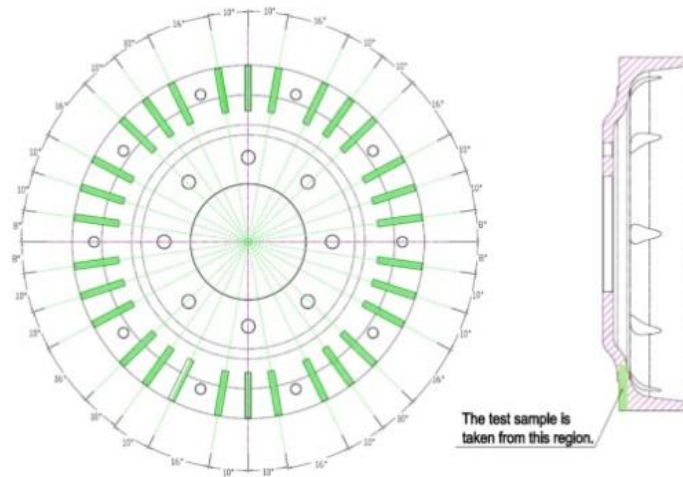


Figure 6. Representation of the test sample region on road wheel



Figure 7. Fatigue testing of road wheel test specimens

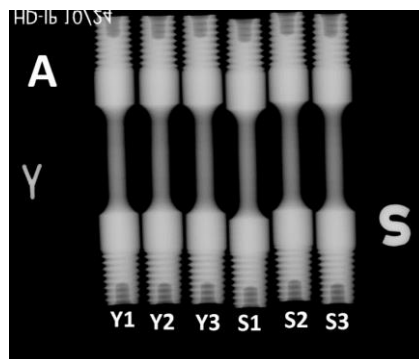


Figure 8. Radiographic test of road wheel fatigue test specimens

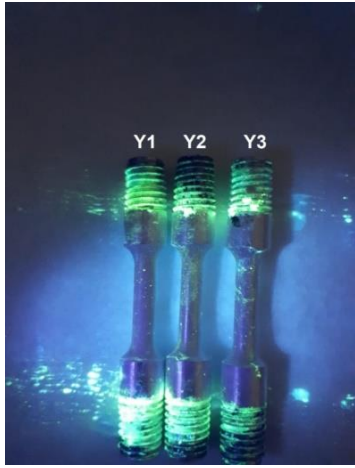


Figure 9. Liquid penetrant inspection of road wheel fatigued test specimens

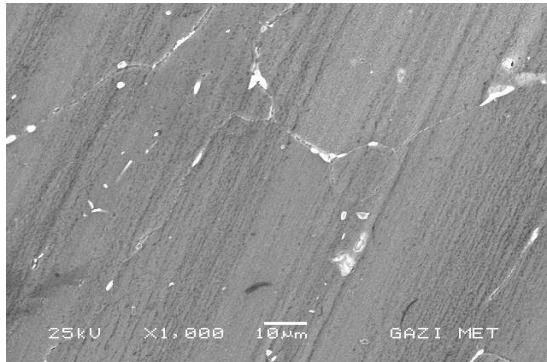
Optical microscope: There are several images taken for both separately fatigued test and non-fatigued test in optical microscope analysis, see Figure 12 and Figure 13.

The surfaces were analysed by optical microscope and it was found that no change in the grain size and not any discontinuity on fatigued and non-fatigued parts.

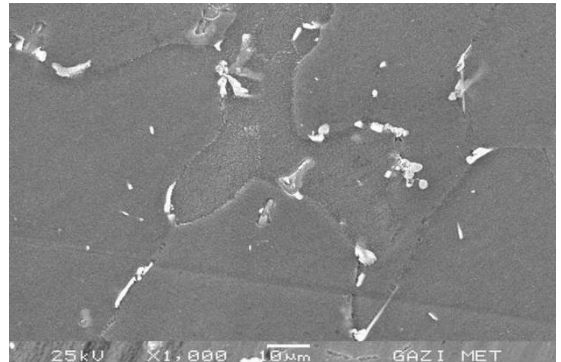
RESULTS AND DISCUSSION

Results Obtained From Fatigue Prediction and Experimental Analysis

First of all, stress analysis of the road wheel has been executed to determine the maximum stress due to static weight of 2,000 Kg experienced per wheel of the vehicle which totally weighs of 47 tones and maximum equivalent stress (von-Mises) just before showing permanent deformation under loading on aluminium road wheel. It was found that maximum compression stress due to static dead weight is going to be 56 MPa and on the other hand maximum compression stress that the wheel is able to carry without permanent deformation is going to be 380 MPa under 23,400 Kg static loading. This maximum compression stress also corresponds to the yield strength of Al 2014 – T6 which is 380 MPa.

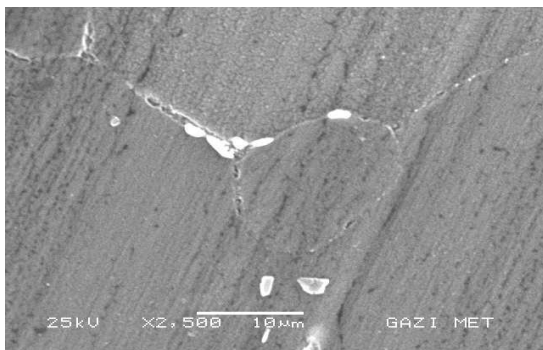


(a)

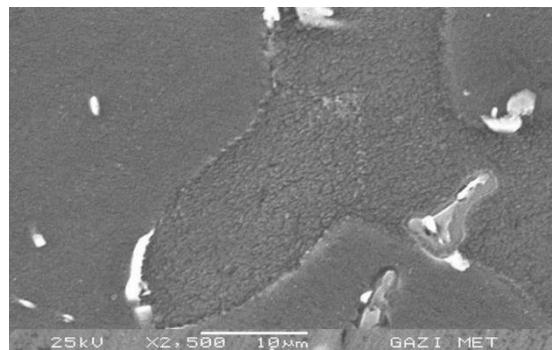


(b)

Figure 10. SEM analysis of (a) fatigued & (b) non-fatigued test specimen in 1000x

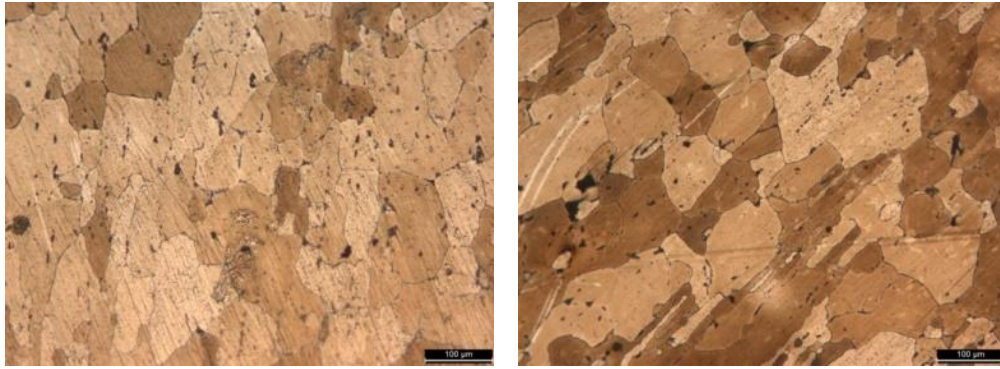


(a)



(b)

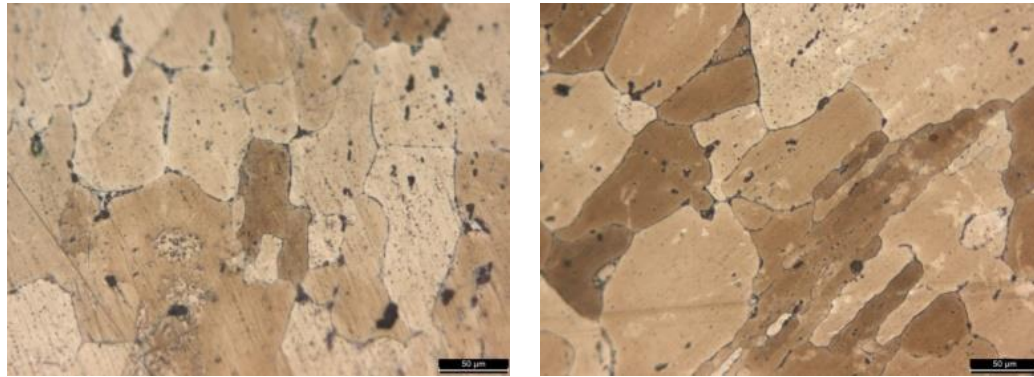
Figure 11. SEM analysis of (a) fatigued & (b) non-fatigued test specimens in 2500x



(a)

(b)

Figure 12. Optical microscope analysis of (a) fatigued and (b) non-fatigued test specimen in 100x



(a)

(b)

Figure 13. Optical microscope analysis of (a) fatigued and (b) non-fatigued test specimen in 200x

Assuming that the road wheel could be practiced under tougher loading conditions, alternating stress has been recalculated based on these tougher conditions. Therefore, maximum stress was selected 324 MPa as near as possible to 380 MPa which is the point that the beginning of permanent deformation value of road wheel and minimum stress value was selected as 80 MPa being over the static dead weight load of 56 MPa for per road wheel. Therefore, the purpose of selecting maximum stress of 324 MPa (18,000 Kg) is to consider harsh environments such as potholes and rocky terrains that aluminium road wheels might be exposed to during the movement of the vehicle.

These stress values will correspond to 210 Kg load for 80 MPa and 850 kg for 324 MPa when considering cross sectional area of test specimen. Therefore, based on this stress values decided, test specimens taken from road wheel was put into the fatigue test numerically with maximum 324 MPa and minimum 80 MPa stress range and based on the data given in Table 1, it could be said that high cycle fatigue life between these loads exists over 19 million cycles to rupture. No fatigue crack is observed in the middle section of test specimens. On the other hand,

test specimens was experimentally fatigue tested in parallel to the numerical prediction between compression stress of 80 MPa and 324 MPa and it was found that none of fatigue damage has been observed on the middle part of test specimen up to 1,500,000 cycles as well.

Discussion and Comments

As a matter of fact, the whole aluminium road wheel could have been fatigue tested as a whole by a special test machine. However, since the manufacturing of this kind of specially designed testing device will be costly in terms of time and money, this method was not preferred at this study.

Normally, the rubber part on outer surface of road wheel is changed in every 10,000 km and rubber part's damping effect was not considered in the finite element analysis. By a simple calculation, the outer radius of road wheel is 628 mm and circumference of the wheel is calculated as 1972 mm. When the road wheel moves forward 2,958 km, each point on the outer ring of the wheel might experience the loads between 2,000 Kg - 18,000 Kg approximately 1,500,000 times.

When the test specimen was tested up to 1,500,000 cycles in testing machine it was found no crack initiation occurred due to cyclic loading, it means that one aluminium road wheel manufactured by flow forming could safely travel at least 2,958 km without any damage and crack. Considering the damping capacity of the rubber pad on the outer ring of the road wheel, this service life can be estimated more than 5,000 km. In other words, the service life of the road wheel is well beyond from 3,000 km. The reason of the limitation of cycles at 1,500,000 during the experiment is just due to savings from time and cost since rubber pad service life is roughly 3000-5000 km.

As clearly known, aluminium is one of the most common elements in the world. When the price and weight of aluminium and steel are compared with each other, aluminium is always lighter but considerably expensive than steel. For this reason, replacing the steel road wheels used in military platforms with the aluminium ones manufactured by flow forming contrary to forging or casting would be more reasonable and beneficial when existing steel one's service life is ended. The densities of aluminium and steel material are 2,7 g/cm³ and 7,85 g/cm³ respectively. When the weight of one aluminium and steel road wheel is calculated, aluminium road wheel is weighed 27 Kg and steel road wheel 79 Kg respectively. There are 24 road wheels in the platform. When all of the road wheels are considered, total weight of aluminium alloy road wheel would be 648 Kg while total weight of steel road wheel is already 1896 Kg. When aluminium road wheels are used in the platform, the total weight of the vehicle would be roughly 1,200 Kg lighter. The aluminium road wheel was only analysed and tested for radial loads. When combined loading is performed on the aluminium road wheel, exact results will be determined. It is only determined that the road wheel is durable in terms of plastic deformation when compression loads are applied in radial direction. A different loading condition such as bending can be analysed and tested for the aluminium road wheel in the future work.

CONCLUSION

Road wheels are the important parts of tracked army platforms and their durability and service life affects survivability of army platforms. The objective of this study was to predict the fatigue behaviour and stress distribution of 2014 – T6 aluminium road wheel of a heavy tracked platform and to see whether the way of manufacturing method of aluminium road wheel would affect fatigue life.

When analysis and test results are considered, it was seen that aluminium road wheel of the platform which was manufactured by flow forming method is durable enough for overloading harshly conditions. In fatigue test, 1,500,000 cycles, verified by numerical analysis, correspond to approximately 3,000 Km running of road wheel. Even though the road wheel had run under these conditions, the aluminium road wheel would definitely survive at least 3,000 Km without any deformation or fatigue crack failure. Since the rubber material around the road wheel will not transfer the higher loads to road wheel due to its damping capability and otherwise, since the aluminium road wheel is subjected to compression - compression loads, crack formation or crack growths would be more difficult. Thus, it could be predicted that the aluminium road wheel would be more durable over its calculated lifetime.

All in all, the use of aluminium road wheel instead of steel road wheel provides weight reduction on tracked land platforms so that aluminium road wheels increase the mobility of the platform or may provide more payload carrying capability. Therefore, aluminium made road wheels might be a good candidate for replacing the existing road wheels manufactured by steel material if they are able to be manufactured by flow forming method due to cost effectiveness. This provides an important advantage over the battlefield.

KARA ARAÇLARINDA ALÜMİNYUM 2014-T6 MALZEME KULLANILARAK SIVAMA YÖNTEMİ İLE YAPILMIŞ PORTÖR TEKERİNİN GERİLME VE YORULMA ANALİZLERİNİN YAPILMASI

Savunma platformlarında kullanılan portör tekerleri getirdiği ağırlığa rağmen geleneksel olarak çelikten kolay ve ucuz bir biçimde üretilmektedir. Portör tekerlekleri için alternatif malzeme daha hafif olan alüminyum alaşımı olup, genel olarak döküm veya dövme üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin dayanıklılık ve üretim maliyeti nedeniyle bir takım zafiyetleri mevcuttur. Bu nedenle, bu çalışmada portör tekerlerinin sivama halindeki alüminyum (2014-T6) kullanılarak sivama yöntemi ile üretildiği takdirde mukavemet ve düşük-döngülü yorulma açısından diğer malzemeler ve üretim yöntemlerine oranla daha iyi bir alternatif olabileceği sayısal ve deneysel olarak ortaya konmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sivama yöntemi, portör tekeri, paletli platformlar, sonlu elemanlar yöntemi, gerilme analizi, yorulma analizi

REFERENCES

1. Das, S., "Design and weight optimization of aluminum alloy wheel", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(6): 1-12, (2014).
2. Nallusamy, S., Prabu, M., Balakannan, K. and Majumdar, G., "Analysis of static stress in an alloy wheel of the passenger car", *International Journal of Engineering Research in Africa*, 16: 17-25, (2015).
3. AMC Pamphlet, *Engineering Design Handbook, Automotive Series, Automotive Suspension*, Headquarters, U.S. Army Materiel Command, Washington, D.C. , 10, (1967).
4. AMC Pamphlet, *Engineering Design Handbook, Automotive Series, Automotive Assembly*, Headquarters, U.S. Army Materiel Command, Washington, D.C., 11, (1965).
5. Rambabu, P., Eswara Prasad, P.N., Kutumbarao, V.V. and Wanhill R.J.H., "Aluminum Alloys for Aerospace Applications", *Aerospace Materials and Material Technologies, Indian Institute of Metals Series*, 29-52, (2017).
6. Davis, J.R J. R *Aluminum and Aluminum Alloys, Alloying, Understanding the Basics*, ASM International, (1993).
7. Groche, P. and Fritsche, D., "Application and modelling of flow forming manufacturing processes for internally geared wheels", *International, Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(11): 1261-1265 (2006).
8. Marini, D., Cunningham, D. and et al, "Flow forming: A review of research methodologies, prediction models and their applications", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(5): 285 – 315, (2016).
9. Wang, L., Chen, Y., Wang, C. and Wang, Q., "Fatigue life analysis of aluminum wheels by simulation of rotary fatigue test", *Journal of Mechanical Engineering*, 57(1): 31-39, (2011).
10. Mandage, A.P., Sharma, M.H. and et al, "Fatigue life estimation of an aluminum wheel rim using finite element analysis", *IJSART*, 2(3): 30-33, (2016).
11. Wong, C.C., Dean, T.A. and Lin. J., "A review of spinning, shear forming and flow forming processes", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(14): 1419-1435, (2003).
12. Paul, D.A., Wang, D.Y., "Fatigue behavior of 2014-T6, 7075-T6 and 7079-T6 aluminum alloy regular hand forgings", *Wright Air Development Centre, WADC Technical Report* (1960).
13. Merati, M.M., Hellier, A.K. and Zarrabi, K., "On the mixed Mode II/III fatigue threshold behavior for aluminum alloys 2014-T6 and 7075-T6", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 35(1): 2-12, (2011).
14. John R. Rumble, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 103rd Edition, CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, FL.

Savunma Sanayiinde Katmanlı İmalat ile Tedarik Zinciri Yönetimi

Katmanlı imalat teknolojisi (additive manufacturing [AM]) sunduğu tasarım esnekliği, optimize edilmiş yapılar ve malzemeler ile ağırlık azaltımı, daha az parça ve birleştirme adımı, daha az atık, az sayıda üretim için daha kısa üretim süresi gibi teknik avantajlarla son yıllarda popüler hale gelmiştir. Geleneksel tedarik zincirinde devrim yapma potansiyeli ile öne çıkan katmanlı imalat süreçleri, merkezîyetçi olmayan üretim ve tedarik yapısı ile savunma sanayiinde de büyük bir potansiyele sahiptir. Bu makalede, eklemeli imalat süreçleri tedarik zinciri bakış açısından gözden geçirilecektir. Gelecekteki savaş ortamlarında değer zinciri senaryolarının katmanlı imalat teknolojileri ile ulaşabileceği potansiyel değerlendirilecektir. Makalede katmanlı imalat teknolojilerinin savunma ve uzay sanayiide kullanıldığı güncel örneklere yer verilirken, bu yöntemlerin daha da çok kullanım bulabilmesi için iyileştirilmesi gereken yönlerine de değinilmiştir.

Anahtar kelimeler: Katmanlı İmalat, Tedarik Zinciri Yönetimi, Katmanlı İmalatla Değer Zinciri, Savunma Sanayii

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 24 Mart 2023

Kabul: 15 Ağustos 2023

*Sorumlu Yazar: Kıvılcım Ersoy
Email: kivilcime@aselsan.com.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1270281>

Atıf şekli/How to cite: Ersoy K., Savunma Sanayiinde Katmanlı İmalat ile Tedarik Zinciri Yönetimi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(2): 63-73

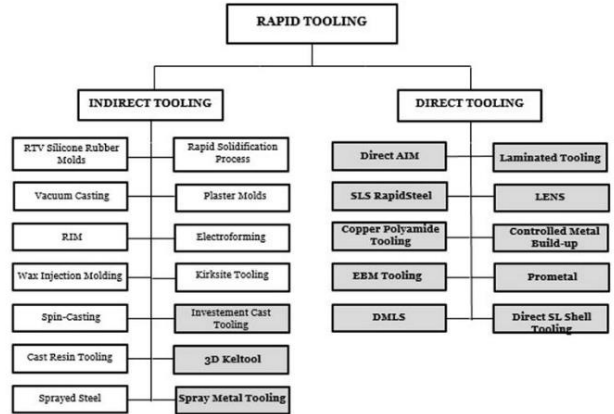
1. GİRİŞ

Dünya literatüründe adı 3D Printing ya da Additive Manufacturing (AM) olarak duyulan katmanlı imalat teknolojileri 30 yıldan uzun süredir araştırılmakta ve son yıllarda araştırma, patent ve ürüne çevrilme hızı gitgide artmaktadır. Talaş kaldırılan konvansiyonel üretim metotlarının aksine malzeme eksiltilecek değil, malzeme katman katman eklenerek 3 boyutlu parçalar direk olarak 3 boyutlu CAD modelleri kullanılarak üretilmektedir. Bu sebeple konvansiyonel üretim teknolojilerinin aksine komplekse geometriler için bile kalıp veya başka kompleks üretim yardımcısına ihtiyaç duyulmadan üretim gerçekleştirilebilmektedir [1, [2]. Bu da küçük sayılı ve merkezsiz üretimler için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Katmanlı imalat teknolojileri 1970li yıllarda ilk defa ‘hızlı prototipleme (rapid prototyping [RP])’ adıyla kullanılmaya başlandı. O yıllarda tasarlanan parçalar örnek veya prototip olarak polimer malzemelerden üretildi.

Daha sonra bu teknolojiler ile az sayıda imal edilecek parçaların kalıplarının üretilmesi

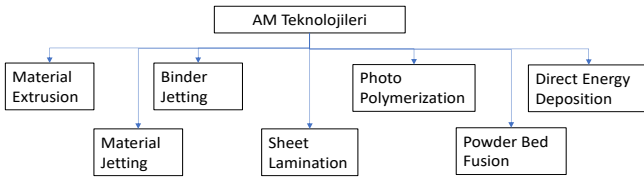
değerlendirildi. Bu literatürde ‘rapid tooling (RT)’ adı ile bilinir [3,4]. Şekil 1’de metal şekillendirme, döküm gibi konvansiyonel metotların üretim yardımcılarının imalatında kullanılan katmanlı RT metotları gösterilmektedir.



Şekil 1: Rapid Tooling Metotları

Geçen yıllarda katmanlı imalat teknolojilerinin kullanım alanı prototiplemeden kalıp imalatlarına, parça tamirinden parça yapımına, yük taşımayan parçalardan tamamen fonksiyonel parçalara doğru gelişmiştir [5]. Günümüzde katmanlı imalatla üretilen parçaların %60'ından fazlası, havacılık, biyomedikal, enerji, otomotiv, inşaat, mobilya ve kuyumculuk gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde tamamen işlevsel ürünlerden oluşmaktadır.

Katmanlı imalat teknolojileri birçok farklı metodu ve malzemeyi içermektedir. Metal, polimer ve seramik malzemelerin kullanılabilirdiği bu alanda üretim teknolojisinin sınıflandırılması malzeme deposizyon yöntemine göre yapılabilir. Günümüzde ekonomik olarak değer yaratan yaklaşık 30 çeşit katmanlı imalat prosesi bilinmektedir. The International Committee F42 on AM bu prosesleri 7 ana kategoride incelemektedir. (Bakınız Şekil 2).



Şekil 2: ASTM F42'ye göre AM teknolojileri

Üretilen malzeme, ömür ve dayanım istekleri, yüzey kalitesi, tezgâh ve parça üretim maliyetleri, üretim ve serim hızı gibi birçok parametreye göre bu teknolojilerden uygun olan seçilmektedir [6]. Birçok AM metodunda üretilen parça büyüklükleri tezgâh büyüklüğü ile sınırlıyken, WAAM gibi katmanlı imalat teknolojileriyle metal ve büyük parçaları üretmek mümkün hale gelmiştir [7, 37].

Havacılık sektöründe ağırlık azaltımı için topoloji optimizasyonu ile tasarım hafifletilip malzeme azaltılmakta, birleştirme sayısının düşürülmesi ile yekpare ya da çok daha az sayıda parça kullanılmakta, bu sayede hem üretim hem lojistik anlamda verimlilik sağlanarak sürdürülebilirlik için önemli çıktılar elde edilmektedir [8]. Katmanlı imalat teknolojileri; kompleks parçaların yekpare olarak üretilmesi, bu sayede ağırlık ve işçilik süresinin azaltılması ve aynı parça içinde farklı mikro yapılar uygulanabilmesi gibi teknik birçok avantaj sunmaktadır.

Ayrıca hızlı tasarım değiştirme ve özelleştirme imkanları sayesinde iyileştirmelerin ürüne çok daha kısa sürede dönüşmesini sağlayarak günümüz ihtiyaçlarına uygun bir üretim altyapısı oluşturmaktadır.

Son yıllarda tedarik zinciri tüm endüstrilerde önemli bir konu haline gelmiştir. Tedarik zinciri, ham malzemelerin üreticilere akışından, müşterilerden perakendecilere gelen geri bildirimlere kadar çok yönlü farklı rol ve sorumluluklara sahip çeşitli kuruluşlardan oluşmaktadır. Pandemi sonrası daha da rekabetçi hale gelen ekonomide uzun ve karmaşık tedarik zincirlerine sahip tüm endüstriler, tedarik zincirlerini daha kısa ve daha basit hale getirmeye mecbur kalmışlardır. Bu ihtiyacın karşılanmasında katmanlı imalat teknolojileri yeni ve heyecan verici imkanlar sunmaktadır [9, 10].

Katmanlı imalat teknolojileri tek bir tezgâh ile birçok parçanın her zaman ve her yerde üretilmesine imkân tanımaktadır. Bu da tedarik zincirini hızlandırmakta ve ürünlerin farklı coğrafyalarda hızlı şekilde pazara sunulabilmesi için fırsat yaratmaktadır. Diğer konvansiyonel üretim metodlarının aksine, 3 boyutlu parça modelleri ve yeteri kadar ham malzeme bulunduğu sürece 3 boyutlu yazıcı tezgâhi ile teorik olarak istenilen yerde istenilen parça kısa sürede basılabilir. Kalıp tasarım ve üretim masrafları olmadığı için de az sayıda üretim yapma maliyeti yüksek değildir AM'in 4. Endüstri devrimiyle hedeflenen nesnelerin interneti ve dijitalleşmiş üretim için de en uygun üretim metodu olduğu bilinmektedir. Bu avantajlar özellikle hazır bulunmuşluğun önemli olduğu endüstrilerde katmanlı imalat teknolojilerini ön plana çıkartmaktadır.

Tüm bu parametrelere ek olarak AM teknolojileri sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmelidir. Kısa teslim süreleri ve düşük stok gerekliliği ile gelen optimizasyon ve tasarrufun yanı sıra atıkların azaltılması ile de daha sürdürülebilir bir ekonomi için katkı sağlamaktadır. Az sayıda stok tutarak karbon ayak izi düşürülebilmektedir [11].

AM teknolojileri ile bazı üretim metot ve tezgâhları geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılmasına olanak sağlamakta, bu şekilde atık malzemeler tekrar kullanılarak doğaya ve çevreye önemli katkılar sağlanmaktadır [11].

Bu makale, geleneksel üretime kıyasla tedarik zinciri yönetimi açısından katmanlı imalat üretim süreçlerinin avantaj ve dezavantajlarına odaklanmaktadır. Savunma sanayinde katmanlı imalat örneklerine yer verilirken tedarik zinciri avantajını savunma sanayinde kullanabilmek için bu teknolojileri güvenilir ve işlevsel bir yol olarak uygulamak için bir dizi öneri getirilmiştir.

2. TEDARİK ZİNCİRİNDE KATMANLI İMALATIN POTANSİYELİ

Şirketlerin en büyük masraf ya da kazanç kalemlerinden birisi tedarik zinciridir. Son yıllarda yerel ve küresel olarak hızla büyüyen şirketlerin üretim yapan şirketlerden ziyade tedarik zincirini iyi yöneten platformlar olduğu bilinmektedir. Alibaba, Airbnb, Trendyol, Getir gibi şirketler buna örnek olarak gösterilebilir. Özellikle uzun tedarik zincirlerine sahip şirketler için tedarik zinciri yönetimindeki tasarruflar ile (nakliye, envanter tutma ve envanter yönetme) çok belirgin kazançlar sağlamaktadır.

Katmanlı üretim için tedarik zinciri, AM teknolojisi kullanılarak üretilen ürünlerin son tüketicilerinin taleplerini karşılayan, birbirine bağlı bir dizi bağımsız mal ve hizmet tedarik ağları olarak tanımlanır. Bu ağ makine satıcılarını, malzeme üreticilerini, yazılım sağlayıcılarını, lojistik operatörlerini, servis bürolarını ve araştırma merkezlerini içerir [10]. Katmanlı imalat yönteminin geleneksel tedarik zinciri yönetimine kıyasla sağlayabileceği birçok fırsat vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Minimum parça ve birleştirme sayısı ile sağlanan endüstriyel verimlilik
- Özelleştirme, kişiselleştirme ve isteğe bağlı üretim
- Minimum takım/kalıp ve hammadde kullanımı ile sağlanan endüstriyel verimlilik
- Üretim için gereken minimum adım sayısı ve (takım üretimine ihtiyaç duymadan) direk 3D Modelden yapılabilen üretim ile sağlanan endüstriyel verimlilik
- Merkezlessiz üretim
- Küçük hacimli / az sayıda üretim
- Tasarımdan üretime giden süreyi kısaltarak elde edilen endüstriyel verimlilik
- Atık azaltımı ve geri dönüşüm ile kazanılan çevresel etki ve sürdürülebilirlik

Katmanlı imalat süreçleri doğası gereği malzeme girdilerini azaltarak endüstriyel verimliliği artırır ve bu şekilde doğası gereği yalın üretime daha yakındır.

Aurora Flight Sciences and Stratasys tarafından üretilen “şimdiye kadar üretilmiş en büyük, en hızlı ve en karmaşık 3D baskılı insansız hava aracı (İHA)”, havacılık endüstrisinden özelleştirilmiş bir ürünün uygun maliyetli geliştirilmesine iyi bir örnektir [12]. Göreve özel olarak tasarlanan uçakta tasarım ve üretim süresi 50% oranında düşürülerek çok belirgin bir fayda sağlanmıştır.

Kişiselleştirme ve özelleştirme katmanlı imalat teknolojilerinin tedarik zincir açısından başka bir avantajıdır. Katmanlı imalat metodları ile müşteri kişiselleştirme ihtiyacından doğan zorluklar konvansiyonel metotlara göre daha basit bir şekilde, yani daha kısa zamanda ve daha düşük maliyet ile çözülebilir.

AM teknolojilerini kullanmanın bir diğer önemli avantajı da kalıp, takım, fişür gibi üretim yardımcılara ihtiyaç olmadığı için küçük hacimli ve/veya tek parça imalatlara uygun olmasıdır. Bu avantaj, müşteri talep ve ihtiyaçlarına göre özelleştirmeye imkân sağlamaktadır. Volvo'nun yapmış olduğu analiz sonucunda otomotiv parçalarının geleneksel üretim ile AM maliyetlerinin karşılaştırılmasındaki başa baş noktasının parça karmaşıklığına bağlı olduğu ve bunların farklı parçalar için farklılık gösterebileceğini göstermiştir [13].

Daha kısa tedarik süreleri, daha düşük maliyetler, geliştirilmiş işlevsellik ve artan özelleştirme yeteneği gibi sağlanan avantajlar nedeniyle AM, takım, kalıp ve insert imalatında da kullanılabilir [4, 14]. Takımların genellikle yüksek geometrik karmaşıklığa sahip ve düşük hacimlerde üretilmesi nedeniyle AM, dökümden işleme süreçlerine, montaj aparatlarından özel tıbbi kılavuzlara kadar çok çeşitli uygulamalar için uygun bir yöntem olacaktır. Katmanlı imalatın imalat yardımcı takımlarında kullanımı otomotivden havacılığa, savunma sanayinden biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu uygulamalarda plastikler, kompozitler, metaller, kauçuk, mum ve kum gibi birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Çek takım üreticisi Innomia firmasının tasarlayıp ürettiği konformal soğutma kanalları olan takım inserti, DMLS metodu ile üretilmiş, bu sayede güvenilirlik ve bakım aralıkları artırılarak, kalite ve maliyet iyileştirilmeleri sağlanmıştır [15].

Ayrıca, AM teknolojisinin hızlı tepki süresi nedeniyle, ürünü pazara sunma süresi (time to market) de önemli ölçüde azalmaktadır. Bu özellik sayesinde üreticiler müşteri taleplerini tam olarak karşılamak için hızlı bir şekilde prototip oluşturabilir ve bu şekilde müşterilerine mükemmel bir hizmet verebilir. Oysa ki, geleneksel yöntemlerde, ürünlerin çoğu seri üretim metodu ile üretilir ve bu da tasarım sürecine müşteri katılımını neredeyse tamamen ortadan kaldırır. Son zamanlarda kullanılan çevik metodlar ya da tasarımcı düşünce metodları için ise tasarım süreçlerine son kullanıcının geri bildirimini olmazsa olmazdır. Yani katmanlı imalat teknolojileri geleneksel üretim metodlarının aksine yeni nesil tasarım ve geliştirme metodlarını desteklemektedir. Geçtiğimiz son 10 yılın ve geleceğimizin trendleri

tüm sektörlerde kişiselleştirilmiş daha küçük sayılı ve kompleks parçaların üretimini gerektirmektedir. Geleneksel üretim metodlarının bunları karşılayabilmesi çok zor olacaktır. Tüm bu sebeplerden dolayı da dördüncü endüstri devriminin üretim metodu olarak katmanlı imalat öne çıkmaktadır.

Katmanlı imalat prosesleri yalnızca imalat sürelerini değil tasarım ve geliştirme sürelerini de kısaltabilmektedir. Böylelikle yeni bir fikrin ürüne dönüşerek müşteriye sunulma süresi kısalmaya ve AM teknolojilerini doğru kullanan firmaların pazara ürün verme ve hızla değişen Pazar isteklerini hızlı bir şekilde cevaplayabilme yetileri artacaktır [16]. Benzer şekilde müşteri isteklerinin hızla değişebildiği ve çevik proje planlarında bunların göz önüne alınarak adimsal olarak tasarım yapılan ürünler için katmanlı imalat diğer üretim metodlarına göre çok açık avantajlar sağlar. Ayrıca AM teknolojilerinin ihtiyaca hızla cevap verebilmesi envanter tutma ihtiyacını da azaltarak operatif maliyet yükünü hafifletmektedir [17].

Merkezsiz üretim avantajı ile üretim noktaları tüketim ve kullanım noktalarına yaklaştırılabilmekte ve bu şekilde transportasyon ve lojistik maliyetleri de azalmaktadır. AM, tüketicilerin ürünlerini onarmak için kendi yedek parçalarını yazdırmalarına ya da yazıcılar ile onarabilmelerine olanak tanır [18]. Parçaların kullanım noktasında veya kullanım noktası yakınında üretilmesi, müşterinin erişilebilirlik beklentilerini sağlamak için gereken envanterleri azaltır, teslimat sürelerini kısaltır, ömür ve bakım aralığı tahminlerinin doğruluğunu önemsiz hale getirir. Bu şekilde envanter tutma, depolama, nakliye, gümrük, vergiler gibi ek işlem ve maliyet kalemlerine gerek kalmadan müşteri taleplerine cevap verilebilir. [18].

Merkezsiz üretimin getireceği yeniliklerde en uç nokta olarak satıcı kontrolünden uzak üretim, yani kullanıcı tarafından üretebilen ürünler olarak görülebilir [19]. Tüketicilerin bir ürünü geleneksel şekilde perakendecilerden satın almak yerine evde üretme hakkı olması durumunda satın alma maliyetinin %80 oranında azalacağı tahmin edilmektedir [20].

Çevreye duyarlılık ve sürdürülebilirlik tedarik zincirine girdi veren bir konudur. Merkezi üretim ile tedarik zinciri adımları kısalmaya ve daha düşük karbon ayak izleri bırakılabilir. AM teknolojilerinde kullanılan tozlar tekrar tekrar kullanılarak hammadde miktarı azaltılabilir. Ayrıca talaşlı proseslerin aksine talaş gibi atıklar üretilmez. Bu durum özellikle de savunma ve havacılık sanayinde kullanılan yüksek bedelli ham malzemeler için önemli bir kazançtır. Ayrıca üretim süreçleri

kısalacağı ve kalıp takım gibi ihtiyaçların da üretilmesi gerektiği için üretim için kullanılan enerji miktarı fark edilir şekilde azalır [21]. Daha az transportasyon ve emisyon oluşur. Ayrıca geri dönüştürülebilen malzemelerin kullanılabilmesi de çevreye duyarlılık açısından önemlidir. Son yıllarda ağırlık optimizasyonunu sağlayabilmek için gitgide daha sık kullanılan karbon fiber malzemelerin geri dönüştürülerek AM ile tekrar kullanımı değerlendirilmektedir [28].

Katmanlı imalat prosesleri doğası gereği zamanla aşınıp hasar görmesi muhtemel olan parça ve takımların tamir edilmesi için uygundur. Toz yatağı füzyonu (powder bed fusion) veya doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition) gibi çeşitli AM teknolojilerinin kullanılması, hasarlı takımları değiştirmek yerine onarmayı bir seçenek haline geliyor. Bu sayede takım ömrü artıp işletme maliyetleri azalacaktır. Bu da önemli miktarda zaman ve para tasarrufu sağladığı gibi daha az atık ile de sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileyecektir. Hasarlı bir takımın örnekleri ve onarılmış durumu kaynaklarda gösterilmektedir [22].

3. KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİSİNDE GELİŞMEYE AÇIK HUSUSLAR

Katmanlı imalat 30 yıldır araştırılan metodolojilerden oluşmakla birlikte süreçleri geleneksel üretimle karşılaştırıldığında nispeten yeni olarak kabul edilebilir. AM teknolojilerinin daha geniş çapta benimsenmesi ve faydaların gerçekleştirilmesi için iyileştirilmesi gereken birçok konu bulunmaktadır.

AM'nin uygulanması, tezgâh üreticisinden teknoloji uygulayıcısına (tasarım ve üretim yapan firma) ve teknoloji uygulayıcısından müşterilerine/tedarikçilerine uzanan iki ayrı tedarik zincirinin kesişim noktasında yer alır. AM teknolojilerini başarılı bir şekilde uygulayabilmek ve üretim sürecine entegre edebilmek için, uygulama sürecinde tezgâh üreticisinin desteği, uygulama başarısının önemli bir faktörü olarak kabul edilmektedir [23]. Zaihiri'nin çalışmalarının önemli bir çıktısı olarak başarılı teknolojik inovasyonun karmaşıklık düzeyi ile kullanıcı-tedarikçi etkileşim süreçlerinin yoğunluğu arasında doğrudan bir ilişki olduğu gösterilmiştir [24].

AM endüstrisinin tedarik zincirini etkileyen bir diğer önemli özelliği, tezgâh üreticilerinin birçok uygulamada aynı zamanda ham malzeme tedarikçisi olmalarıdır. Bu durumda katmanlı imalat tezgâh üreticileri ve bunları kullanarak üretim yapan firmalar arasında tezgâh tedarikinden sonra da hammadde ihtiyacı için sürekli bir bağlantı olması gerekmektedir. Başka bir deyişle, üretici tezgâh

üreticisi ile bir nevi stratejik ortaklığa girmiş olur. Üretim tezgâhı-hammadde bağımlılığı teknolojinin henüz yeterince olgunlaşmamış olmasına bağlanabileceği gibi bir satış stratejisi olarak da değerlendirilebilir.

AM'nin tedarik zinciri yönetimine ilişkin bazı diğer sınırlamaları imalat yöntemi süreçlerinin halen gelişmekte olmasına bağlayabiliriz. Aşağıdaki konuların netleştirilmesiyle AM tedarik süreçleri daha belirli hale gelecektir:

- Farklı uygulamalar için birçok farklı katmanlı imalat metodu, sayısız tezgâh üreticisi ve farklı birçok malzeme olması az tezgâh ile birçok parçanın merkezsiz üretim avantajını engellemektedir.
- AM'nin potansiyel kullanımları ve faydaları hakkında tasarımcıların ve mühendislerin eğitim ihtiyacı bulunmaktadır. Bir başka ifade ile katmanlı imalat için tasarım (design for Additive Manufacturing) becerilerinin desteklemesi ve geliştirilmesi gerekmektedir.
- Özellikle fonksiyonel parçalar üretmek için uygun olan ekipman ve malzeme fiyatları oldukça yüksektir. Fiyat efektif çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Sertifikasyon ve kabuller için prosedürler ve standartlar geliştirilmelidir.
- Kalite ve Giriş Kalite Kabul süreç ve kriterleri belirlenmeli ve standardize edilmelidir.
- Çok sayıda üretim yapılacağı durumlarda sınırlı katman yığılma hızı ile üretim hızları düşük kalarak hızlı teslimat sağlanamayabilir.
- Bazı katmanlı üretim teknolojileri ile üretilebilecek parça boyutları tezgâh büyüklüğü ile sınırlıdır.
- AM teknolojileri ile üretilen parçaların saha kullanımları az olduğu için güvenilirliği ile ilgili az bilgi bulunmaktadır ve parça bakım tamir veya değişim süreleri tam doğru olarak tahmin edilememektedir.
- Malzemeler halen geliştirilmektedir, malzemeler standarize olmuş değildir.
- Bazı AM teknolojilerinin yüzey kalitesi ve işlem sonrası estetiği fonksiyonel yüzey olarak kullanılmaya uygun olmadığı için ekstra yüzey post-proses işlemleri gerektirmektedir.
- AM teknolojileri ile üretilen parçaların farklı çevresel koşullar altındaki performansına ilişkin bilgi eksikliği bulunmaktadır.
- AM aracılığıyla yapılan ürünlerin satış sonrası süreçlerinde (ömür ve bakım süresi tahminlemeleri, garanti süresi) belirsizlikler bulunmaktadır.
- Merkezi üretim avantajı kullanıldığı zaman IP haklarının nasıl korunacağı ile ilgili bir süreç gelişmemiştir.

- Dijitalleşmenin tüm avantajları kullanıldığı zaman siber güvenlikle ilgili tedbirler alınmalıdır.

Geleneksel teknolojilerin aksine, AM süreçleri için ürünleri üretme/satın alma kararları (make-buy decisions) konusunda oturmuş bir uygulama veya kural dizisi yoktur. Bu kararı etkileyen çok sayıda faktör vardır. Bu faktörlerin çoğu, çeşitli endüstriler için genelleştirilemeyecek kurumsal stratejik düzenlemelerle ilgilidir ve zamanla firmaların deneyimleri ile oluşturulur. Katmanlı imalat teknolojileri için bu kural dizinini oluşturabilecek veri tabanı henüz bulunmamaktadır [25].

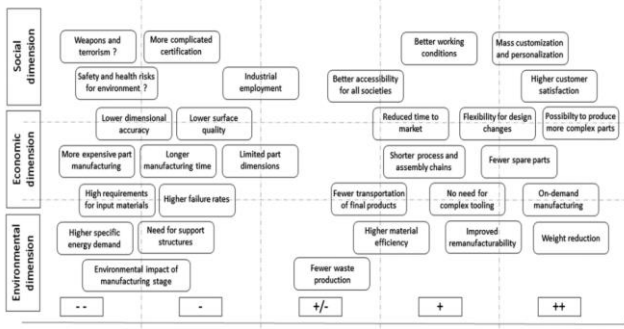
Hangi katmanlı imalat teknolojisinin seçileceği hem üretilecek ürünün isterlerin hem de operasyonel faktörlerin (ürün tasarım yetkinliği, üretim süreçlerinin planlanması, envanter yönetimi, kalite kontrol, maliyet ve entegrasyon) fonksiyonudur. Tüm bu sebeplerden dolayı katmanlı imalat ile üretilen parçalar üret-satın al kararlarının belirli standartlar ile alınabilmesi için çokça deneyim gerekmektedir.

Eğer tasarlanan parçalar katmanlı imalat teknolojileri ile üretilecekse, yapılacak üretimin nerede yapılacağı (make/buy kararı) değerlendirilmelidir. Üretilecek parçanın şirket içi bir tezgâh alımı ile mi gerçekleştirileceği ya da dışarıda halihazırda bu tezgâhı kullanan bir firmaya da mı üretileceği kararı birçok faktöre bağlıdır. Yüksek yatırım maliyeti ve yüksek genel giderler firma içi üretimin dezavantajlarını oluştururken, bilgi gizliliği, IP haklarının korunma kritikliği ve dışarıdaki firmaya üretim için ödenen bedelin şirket içi bilgi kazanımı getirmemesi başka firmadan hazır olarak satın alma kararının sınırlamalarıdır [25]. Ayrıca şirketin stratejik hedeflerinde AM teknolojilerinde gelişmek ya da bu teknolojilerle üretim olup olmaması ya da katmanlı imalat konusunda stratejik bir ortaklık yapma kararı bulunması da çok önemli bir faktördür. Bu karar üretilecek parçaların kritikliğine, miktarına ve olası stratejik ortakların yetkinliğine göre değerlendirilmelidir.

[21] çalışmasında AM uygulamaları için birçok faktörü inceleyen kavramsal bir çerçeve [21] çalışmasında önerilmiştir. Bu çalışmada AM teknolojilerinin geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırılmasının özeti Şekil 3'te sunulmuştur.

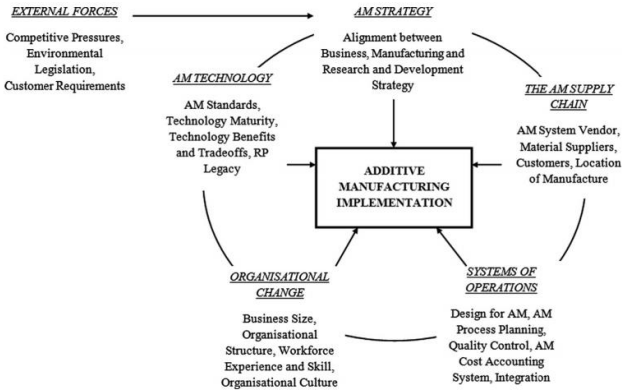
Stratejik bakış açısıyla AM ekipmanının yüksek kullanımı, herhangi bir teknoloji yatırımı için önemli bir faktördür. Bununla birlikte yapılacak yatırımların yeni üretim yetenekleri ve yeni iş fırsatları oluşturabileceği de düşünülmelidir. İş stratejisinden teknik faydalara mantıklı bir bağlantı olmadan AM yatırımları yapan bir şirket rekabet

avantajı elde edemez. Yani bir şirketin teknolojik yatırım planı, iş planı ve stratejileriyle uyumlanmalıdır. AM yatırımı yapılırken teknolojinin olgunluk seviyesi ve bunu yukarı çıkartmak için gereken Ar-Ge eforları da göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 3. Katmanlı imalat teknolojilerinin geleneksel üretim metotlarına göre avantaj (++) ve dezavantajları (-) 21

AM teknolojilerinin uygulanmasında diğer bir iyileştirilmesi gereken boyut ise, organizasyon işgücünün deneyimi ve yetkinlikleridir. AM teknolojileri kullanımında, tasarımcıların ve mühendislerin üretim için tasarım (DFM: design for manufacturing) konseptini yeniden değerlendirmeleri ve alışkın oldukları düşünce tarzından yeni bakış açılarına esneklik göstermeleri gerekir. DFM, üretim kısıtlamalarının ve fırsatların tasarım sürecinde dikkate alındığı ve bir karar faktörü olarak değerlendirildiği bir tasarım felsefesidir.



Şekil 4. Katmanlı imalat uygulama temelleri 23

İyileştirmeye açık bir diğer husus da metal parçalar için katmanlı imalat teknolojilerinin kullanılması noktasında netleştirilmesi gereken konulardır.

Katmanlı olarak üretilmiş metallerin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi birçok araştırma grubu tarafından araştırılmaktadır. Tüm bu çabalara ve gelişmelere karşın mikro yapı ve mekanik

özelliklerdeki anizotropi ve heterojenlik, yüksek güvenilirlik ve dayanım isteri olan ürünler için AM metal işlemlerinin sınırlamaları olmaya devam etmektedir. Metal AM teknolojileri tarafından üretilen parçalar, yüksek yoğunluklu enerji girişi, yönlü ısı çıkarma, eritme, yeniden eritme ve hızlı katılaşmayı içeren çok karmaşık bir döngüsel termal geçmişe maruz kalır. Anizotropik ve heterogon mikro yapılara ek olarak, gözenekler, düzensiz yüzey pürüzlülüğü, bir katman içerisinde veya katmanlar arasında füzyon eksikliği gibi birçok kusur AM işlemlerinin bir sonucu olabilir. Metal katmanlı imalat teknolojilerinin sunabileceği tüm potansiyeli anlamak için farklı malzemelerin çeşitli işleme koşulları altında oluşan anizotropik ve heterojen mikroyapı ve mekanik özelliklerin daha fazla araştırılması ve tekrar edilebilir şekilde yeterli dayanımların elde edilmesi zorunludur 26.

Katmanlı imalat süreçlerini etkin bir şekilde ticarileştirmenin önündeki engellerden birisi de, AM yapımı parçaların güvenilirliği hakkında bilgi eksikliği ve bundan kaynaklanan yapısal bütünlük ve ömür analizlerinin yeterince olgunlaşmış olmamasıdır. Ayrıca AM bileşenlerinin döngüsel yükleme altındaki mekanik davranışlarının ve bunların yorgunluk dayanımına etkisinin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı AM ile üretilen metalik parçaların farklı çevresel durumlarda ve yükler altında güvenilirlik bilgileri geleneksel üretim metotlarındaki kadar gelişkin ve güvenilir değildir. Özetle, AM ile üretilen parçaları içeren emniyet kritik tasarımlar için mekanik yorulma tabanlı bir ömür değerlendirme yönteminin geliştirilmesini gerektirir [27].

4. KATMANLI İMALATIN SAVUNMA SANAYİNE KATKILARI ve POTANSİYELİ

Gelişen teknolojiler ve 4. Sanayi devrimin getirdiği teknolojik, sosyal ve kültürel değişiklikler ile savaş ortamları ve savaş senaryolarının da değişmesi kaçınılmazdır.

Yeni dünya düzeninde ülkeler arası savaşlardan ziyade merkeziz savaşlar, meskün mahalde gerçekleşen gerilla – devlet savaşları ve siber savaşlar görülmektedir. Ayrıca birçok büyük ülke kendi topraklarında değil, başka ülke topraklarında savaşmakta ya da başka coğrafyalardaki savaşları desteklemektedir. Amerikan Savunma bakanlığı uzay ve siber uzayı da yeni çağda bir savaş alanı olarak tanımlamıştır.

Bu durumda güçlü ülke ordularının merkeziz savaşlara, yani gerektiği anda başka coğrafyalarda çatışma durumuna hazır olması beklenmektedir. Bu durumda ordular için en önemli kriterlerden birisi de envanterin çok yüksek bir hazır bulunuşluk

sağlamasıdır. Yüksek hazır bulunuşluğun farklı coğrafyalarda dahi sağlanabilmesi için envanter yönetimi, tedarik süreleri, hızlı bakım onarım yapabilmeye kabiliyetleri, hızlı tasarım iyileştirme ve uygulama yetenekleri önem kazanmaktadır. Güçlü ordular hedeflerinde her yerde savaşa hazır olma hedefini açıkça belirtmekte ve yol haritalarını buna uygun şekilde geliştirmektedir [29].

Çatışma durumlarında zaman en önemli unsurdur. Çatışma durumlarında hazır bulunuşluk insan hayatı ile direkt olarak ilişkili olduğu için diğer tüm değişkenler önemini kaybetmektedir. Operasyonlarda hasar gören sistemler için küçük hacimli özelleştirilmiş bileşenlerin üretilmesi, yine operasyonlarda hasar gören komponentlerin katmanlı imalat teknolojileri ile tamir edilebilmesi ve/veya bozulan parçaların yedeklerinin katmanlı imalat teknolojileri ile savaş alanında taşınan bir katmanlı imalat tezgâhı ile üretilmesi katmanlı imalatı savunma sanayi tedarik zinciri için vazgeçilmez kılmaktadır.

Savunma sanayinde kullanılan birçok platformun ömür devri diğer sektörlere göre oldukça uzundur. Bu da kullanılan parçaların demode olmasını ve demodelik yönetiminin yapılmasını beraberinde getirir. Bazı durumlarda komponentlerin tedarikçileri ya da üretimde kullanılan kalıplar güncel olmayabilir. Böyle durumdaki mekanik parçalar için tersine mühendislikle ve katmanlı imalat teknolojileri kullanarak üretmek mümkün ve ekonomik olacaktır. Savunma sanayi için operasyonlarda hasar gören sistemler için küçük hacimli, özelleştirilmiş bileşenlerin üretilmesi ve yedek/aşınan parça tamiri kritik bir ihtiyaçtır.

AM ile sadece üretim ve tamir zamanı değil, yeni ürünlerin tasarım ve geliştirme aşamasında gerekli zaman da azaltılabilir. Savunma sanayinde bir çatışma durumunda fark edilebilen bir tasarım iyileştirmesine AM ile yapılan parçalarda daha hızlı tepki verebilir.

Hele ki farklı coğrafyalarda savaşılması durumunda stok bulundurmaya zorunda olmamak büyük bir avantaj getirecektir [30].

Makalenin giriş kısmında anlatılan diğer tüm avantajlar göz önüne alınmasa dahi sadece AM'nin imkân tanıdığı merkezsiz ve dağıtılmış üretim avantajı savunma sanayi envanterinin kısa bir süre içerisinde belirli bir kısmının katmanlı imalat ile üretilmiş parçalardan oluşturulması gerekliliğini getirmektedir.

Amerikan Savunma Bakanlığının Amerikan Ordusunun 2017 yılında yalnızca lojistik operasyonlar için 1.194 milyar USD harcadığı açıklamıştır 28. Bunu göz önünde bulundurarak

Amerikan Donanmasının gemilerinde 3 boyutlu yazıcılar bulundurmasına şaşırılmamalıdır 32. Parçaların birçoğu aynı tezgâhlarda üretilebilecek şekilde ortaklaştırarak ve üretim yapılabilecek tezgâhın gemide konuşlandırılarak katmanlı imalat teknolojilerinin avantajlarından en iyi şekilde faydalanılabilir ve bu şekilde maliyet etkin şekilde farklı coğrafyalarda hazır bulunuşluk sağlanabilir.

Amerikan Ordusu Deniz Kuvvetleri misyonlarında da biyomedikal cihazların üretilmesi ve savaş durumunda birliklerin hayatta kalmasına katkı sağlanması öngörülmektedir. Amerikan donanması USS-Essex isimli amfibi hücum gemisinde 3D yazıcılar yerleştirdiğini ve burada plastic şırınga, neşter, güverte kapağı gibi birçok tıbbi ürün ve askeri yedek parça üretildiğini açıklamıştır [32]. U.S. Navy Proceedings'te yayınlanan bir makalede gemi filolarının eklemeli imalat fabrikalarına dönüşerek birçok bakım, onarım ve yedek parça imalatlarının bu şekilde üretilbileceği savunulmuştur. Hatta daha da fütüristik bir bakış açısıyla insansız deniz sistemleri arttığı zaman da birçok görevi icra edebilecek robot mürettebatların 3D yazıcılarda basılarak üretilbileceği ifade edilmiştir [33].

Savaş senaryolarında 3D Yazıcılar karada da hızlı saha çözümleri sunmaktadır. Amerikan Ordusu Afganistan'da hazır bulunuşluğu arttırmak için Hızlı Teçhizatlandırma Sahasını (ingilizce adıyla: Rapid Equipping Fielding [REF]) devreye almıştır. Bu Sahalarda askeri birliklerde ortaya çıkan ve daha önce öngörülmemiş ihtiyaçların hızlı bir şekilde çözümlenerek birliklere ulaştırılması hedeflenmiştir. Buralarda pil adaptörleri veya mayına karşı korumalı araçlar için (MRAP) lastik şişirme sistemleri gibi birçok başarılı uygulama yapıldığı rapor edilmiştir [34]. Bu tip hızlı saha çözüm merkezlerinde 3D katmanlı imalat prosesleri sayesinde biyomedikal uygulamalar yapılması ve askeri yedek parça ya da mühimmatların basılması da hedeflenmektedir [35].

Savaş durumlarında 3D yazıcılar ile yaralanan askerler için kişiselleştirilmiş protez, implant ve organ basılarak kayıpların minimuma indirilmesi yine katmanlı imalat teknolojilerinin en önemli savunma misyonları içerisinde yer almaktadır.

Katmanlı imalat teknolojilerinin merkezsiz üretim avantajının en önemli örneği de katmanlı olarak inşaat yapıları kurulabilmesidir. İnşaat alanında kullanılan 3 boyutlu yazıcılar ile bina, cephe, barınak gibi sığınmak için kullanılacak yapıların yanı sıra köprüler de inşa edilerek farklı coğrafyaların koşullarına hızla adapte olunabilir [36].

Bu tarz büyük yapılar yalnızca beton kullanılarak değil aynı zamanda metal ile de Shaped

Metal Deposition ya da EBAM metodlarıyla üretilebilmekte ve savunma sanayiinde kullanıma uygun hale gelmektedir [37].

Uzay sanayiinde de merkezsiz ve yerinde üretimin büyük avantajları bulunmaktadır. Uzay uygulamalarında ağırlık en önemli faktördür. Ağırlık azaltımı için yapısal olarak optimize edilmiş ve titanyum gibi hafif alaşımların kolaylıkla kullanılabilmesi AM teknolojileri uzay uygulamaları için de rakipsiz kılmaktadır. Mars'ta yaşama vizyonunda direk enerji lazer metoduyla Mars gezegeninde üretim yapabilecek tezgahlar planlanmakta, hammadde olarak da ay tozu kullanılabilmesi belirtilmektedir [38]. 2016 yılında ay tozundan lazer eritme yöntemi ile imalat yöntemi uzayda AM ile üretime yeni bir bakış açısı katmıştır [39].

Tüm bu avantaj ve bununla birlikte gelen olası kullanım alanlarının gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sayısız metot, malzeme ve tezgâhın en uygun olanlarının seçilerek belirlenmesi ve bazı parçaların bu öne çıkan AM metot ve malzemelerine göre yeniden tasarlanması gerekmektedir. Eğer belirlenen birkaç üretim tezgâhi ile birçok farklı uygulama yapılabilirse bu verimi daha da arttıracak ve savaş alanında hazır bulunuşluğa daha da fazla katkı sağlayacaktır. Bu yüzden ümit vaat eden teknolojileri önceliklendirilerek proses en iyileştirilme süreçleri hızlandırılmalıdır. Katmanlı teknolojilerle benzersiz ve karmaşık ürünler üretilebilmesi için tasarım paradigmasının da değişmesi gerekmektedir. Katmanlı imalat için tasarım çalışmalarının yapılması faydalı olacaktır. Ayrıca, savunma sanayinde katmanlı imalatın avantajlarının en iyi uygulanıp ürüne çevrilebilmesi için aşılması gereken kalite ve sertifikasyon isterleri bulunmaktadır [40]. Niş bir kullanımdan endüstriyel kullanıma geçilebilmesi için ürünün olgunlaşması yani teknoloji hazırlık seviyesinin en üst düzeye gelmesi gerekmektedir. Bu da seri üretimde kullanıma çevrilebilmek için gereken tekrarlanabilirliği sağlayacak tutarlı ve sistematik bir mühendislik desteği ile kalite kabul kurallarının belgelenmesini sağlayabilecek kadar yeterli veri, dokümantasyon ve standardizasyon içermektedir. Tekrar edilebilirlik, kalite, üretim metot, tezgâh ve malzemelerinin önceliklendirilmesi gibi hayati meseleler belirlendikten sonra daha önce belirtildiği gibi şirketlerin make/buy kararlarının oturmuş pratiklerinin oluşturulması gerekmektedir.

Bunların yanı sıra merkezsiz ve direk 3D datadan üretimin savunma sanayinde kullanılabilmesi ve 4. Sanayi devriminin katmanlı imalatla en yüksek avantajının kullanılabilmesi için siber güvenliğinin de sistematik bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Tüm avantajlar değerlendirildiğinde tüm yukarıda belirtilen belirsizlik ve iyileştirme noktalarına rağmen AM'in sunduğu olanaklar bu teknolojilerin yaygınlaştırılmasını gerekli kılmaktadır.

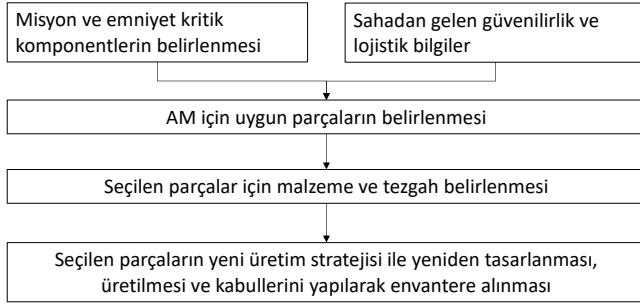
5. TÜRK SAVUNMA SANAYİİ İÇİN YAKLAŞIM ÖNERİSİ VE SONUÇ

İlerleyen teknoloji ile üretim süreci, ürün kompozisyonlarındaki hız, karmaşıklık ve çoklu malzemelerin daha önemli hale geldiği bir eğilime doğru gitmektedir. Katmanlı imalat, geniş bir uygulama yelpazesi olduğu ve yeni gelişen mega trendler için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yüzden de muazzam bir büyüme potansiyeline sahiptir. Ancak, henüz görece yeni olduğu için katmanlı imalat teknolojileriyle ilgili birçok belirsizlik bulunmaktadır. Geliştirme alanları da göz önüne alınınca, bu teknolojinin ancak ana zorluklar sistematik bir şekilde ele alınabilirse geleceğin temel teknolojilerinden biri haline gelebilecektir.

Katmanlı imalat teknolojilerini özellikle savunma sanayiinde hazır bulunuşluk ve merkezsiz üretim avantajlarıyla geleceğin teknoloji olarak görülmektedir. Savunma sanayinde tedarik zinciri anlayışını tamamen değiştirebilecek birçok fırsatın değerlendirilebilmesi için öncelikle kullanıma uygun metot, malzeme ve bunların üretilebileceği tezgahlar belirlenmeli ve birçok komponent de bu seçime uygun olarak tekrar tasarlanmalıdır. Bunların yapılabilmesi için tüm paydaşların gerekli eğitimlerinin tamamlanması gerekecektir.

Katmanlı imalat teknolojilerinin savunma sanayi için gelebileceği en uç nokta sahada ihtiyaca göre parçaların sahra ortamında üretilmesi ve/veya tamir edilmesidir. Bunun mümkün olabilmesi için en avantajlı malzeme, tezgâh ve üretim metotlarının seçilmesi, envanterin özellikle de kritik ve ömürlü parçaların yeniden bu seçimlere uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. AM için yeniden tasarlanacak parçalar seçilirken sahadan gelen lojistik istatistik bilgileri kullanılarak öngörülebilir bakım (predictive maintenance) önlemleri uygulanmalıdır. Seçilecek metot, tezgâh ve malzemeler, hava, kara ve deniz araçları için ortaklaştırılmaya odaklanılmalıdır. Örneğin, büyük metal parçalar ve tamir için ekonomik bir yöntem (direk enerji transferi yöntemlerinden bir tanesi), hafif tasarımlar gerektiren, iyi yüzey kalitesindeki havacılık ve uzay uygulamaları için bir yöntem ve malzeme (titanyum toz yatağı füzyonu metotlarından birisi), tıbbi yardım malzemeleri ve diğer plastik bazlı malzemeleri üretebilmek için (FDM veya SLS gibi) bir metot seçilebilir. Katmanlı imalattaki parça değişiminde ekonomik başa baş noktası yakalanmasından ziyade hazır bulunuşluk ve her an hazır durumda olma kriteri önceliklendirilmelidir.

Mobil üretim merkezleri için en uygun platform olacaktır. Bunların yapılabilmesi için personel eğitimleri tamamlanmalı ve belki de kalite/tedarikçi yetkilendirmeleri yerine personel yetkilendirmelerine giden bir yeni bir sistem kurulmalıdır.



Şekil 5. Katmanlı imalat teknolojilerinin savunma sanayi için kullanım akış şeması

Katmanlı imalat teknolojilerini ülkemiz için büyük öneme sahip olan savunma sanayi için en verimli şekilde kullanılabilmesi için yol haritası belirlenmeli ve sistematik şekilde uygulanmalıdır. En kısa sürede ve etkili katkıyı alabilmek için devletin teknoloji stratejisi, Savunma sanayi yol haritaları ve şirketlerin yol haritaları örtüşmeli ve öncelikli alanlarda yerli şirket ve araştırma kuruluşlarının ortak çalışılması için yol açılmalıdır. Sistematik bir çalışma ile katmanlı imalat teknolojileri ülkemiz için büyük bir atılım yapma potansiyeli barındırmaktadır.

SUPPLY CHAIN MANAGEMENT IN DEFENSE INDUSTRY WITH ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing (AM) gains more and more importance in the recent years due to its technical advantages (flexibility in design, weight reduction by optimized materials and design, less waste, reduced production time) and potential to revolutionize the conventional supply chain. The AM process offers a huge potential in defense industry, as it enables decentralized manufacturing and supply as well as small volume manufacturing. In this article, the AM process is reviewed from a supply chain point of view, focusing on its advantages and potential on future value chain scenarios, together with the areas open for further improvement. Up to date examples of real-life additive manufacturing applications are also discussed.

Keywords: Additive Manufacturing, Supply Chain Management, Value Chain with Additive Manufacturing, Defense Industry

KAYNAKÇA

1. Guo N., Leu M.C. (2013). *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*, Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3), pp.215-243.
2. Discounts, A. (2019). *Additive Manufacturing Strategies – You Can Obtain And Enjoy Discounts – Tops bag mart | Informative Articles Can Improve Your Business*. [online] Topsbagmart.com. Available at: <http://www.topsbagmart.com/business/additive-manufacturing-strategies-you-can-obtain-and-enjoy-discounts/> [Accessed 1 Apr. 2019].
3. Ersoy K. (2009): *Verschleißprognose für Ziehwerkzeuge aus alternativen Herstellungsverfahren*, Dissertation, Technische Universität Muenchen (TUM)
4. Ersoy K., Celik B.B. (2019): *Utilization of Additive Manufacturing to Produce Tools, Intech Open, Design Engineering and Manufacturing*, ISBN: 978-1-78985-865-5, 2019, doi: 10.5772/intechopen.89804
5. Holmström, J. et al. (2010). *Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment*. Journal of Manufacturing Technology Management, 21(6), pp.687–697.
6. Ersoy K., Koc B., Yasa E.: *A Technological and Business Perspective of Additive Manufacturing for Defense Industry*, The 18th International Conference on Machine Design and Production, UMTİK, 2018
7. Yıldız A. S., Davut K., Koc B., Yılmaz O., *Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.108, Pp.3391-3404, 2020
8. Khajavi, S.H., Partanen, J. & Holmström, J. (2014). *Additive manufacturing in the spare parts supply chain*. Computers in Industry, 65(1), pp.50–63. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166361513001565> [Accessed October 26, 2014]
9. Pour, M.A., Zanardini, M., Bacchetti, A., Zanoni, S. (2016). *Additive manufacturing impacts on productions and logistics systems*. IFAC-PapersOnLine. 49, pp.1679–1684.
10. Attaran, Mohsen, (2017). *Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics*. Journal of Service Science and Management

11. Mani, M., Lyons, K.W. & Gupta, S.K. (2014). *Sustainability Characterization for Additive Manufacturing*. 119, pp.419–428.
12. Stratasys Ltd. (2015). *Aurora Flight Sciences and Stratasys Deliver World's First Jet-Powered, 3D Printed UAV in Record Time*. [online] Available at: https://www.aurora.aero/wp-content/uploads/2015/11/SSYS_News_2015_11_9_Stratasys_Corporate.pdf [Accessed 1 Apr. 2019].
13. Edlund P., (2017). *Additive Manufacturing in Low-volume Production: Business Case for Metal Components*. [online] Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/251245/251245.pdf> [Accessed 1 Apr. 2019].
14. Cotteleer M., Crane J., Neier M., (2014). *3D opportunity in tooling: Additive manufacturing shapes the future*. [online] Available at: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-tooling.html> [Accessed 1 Apr. 2019].
15. EOS GmbH Electro Optical Systems, (2019). *Tooling: Innomia - Czech Tool Manufacturer Relies on Additive Manufacturing for Complex Customer Projects*. [online] Available at: https://www.eos.info/press/case_studies/Innomia [Accessed 1 Apr. 2019].
16. Michalik J., Joyce J., Barney R., McCune G., (2015). *3D opportunity for product design: AM and the early stage*. [online] Available at: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3d-printing-product-design-and-development/DUP_708_3DOpportunityProductDesign.pdf [Accessed 1 Apr. 2019].
17. Lindemann, Christian & Jahnke, Ulrich & Habdank, Matthias & Koch, Rainer, (2012). *Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing*. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012
18. Walter, Manfred & Holmström, Jan & Yrjölä, Hannu, (2004). *Rapid manufacturing and its impact on supply chain management*. Proceedings of Logistics Research Network Annual Conference, Dublin, Ireland
19. Campbell T., Williams C., Ivanova O., Garrett B., (2011). *Could 3D printing change the world?* Atlantic Council Strategic Foresight Report
20. *Institution of Mechanical Engineers, (2011). DIY manufacture to 'slash supply chains'*. [online] Available at: [www.imeche.org/news/engineering/diy-](http://www.imeche.org/news/engineering/diy-manufacture-to-slash-supply-chains-) manufacture-to-slash-supply-chains- [Accessed 1 Apr. 2019].
21. Kellens, K., Baemers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R. and Duflou, J. R. (2017). *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications*. Journal of Industrial Ecology, 21(S1), pp.S49-S68.
22. EOS GmbH Electro Optical Systems, (2019). *ToolRepair with Additive Manufacturing by EOS*. [online] Available at: https://www.eos.info/industries_markets/tooling/tool_repair [Accessed 1 Apr. 2019].
23. Mellor S., Hao L., Zhang D., (2014). *Additive manufacturing: A framework for implementation*. International Journal of Production Economics, 149, pp.194-201.
24. Zairi M., (1998). *Supplier partnerships for effective advanced manufacturing technology implementation: a proposed model*. Integrated Manufacturing Systems, 9(2), pp.109-119.
25. Ampower Insights, (2019). *Additive Manufacturing Make or Buy?* [online] Available at: <https://ampower.de/en/insights/cost-additive-manufacturing-make-or-buy-2/> [Accessed 1 Apr. 2019].
26. Kok Y., Tan X.P., Wang P., Nai M.L.S., Loh N.H., Liu E., Tor S.B., (2018). *Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review*. Materials & Design, 139, pp.565-586.
27. Chen, Dr B. (2017). *Cyclic Deformation and Damage Mechanisms in additive manufactured Ti-6Al-4V with Graded Microstructures*. Engineering Prioritization Panel Meeting, [online] Available at: <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOVViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P025978/1> [Accessed 1 Apr. 2019].
28. Yasa E., Ersoy K.: *Dimensional Accuracy and Mechanical Properties of Chopped Carbon Reinforced Polymers Produced by Material Extrusion Additive Manufacturing*, MDPI, Materials 12(23), 3885, 2019, doi: 10.3390/ma12233885
29. Office of the Secretary of Defense. *Summary of the 2018 National Defense Strategy*. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2018. <https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/2018-National-Defense-Strategy-Summary.pdf>
30. Office of the Secretary of Defense. *Department of Defense Additive Manufacturing Strategy*. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2021

31. Autonomous Manufacturing Ltd. (2018). *How is 3D Printing Transforming the Defence Industry?* [online] Available at: <https://amfg.ai/2018/06/19/how-3d-printing-is-transforming-the-defence-industry/> [Accessed 1 Apr. 2019].
32. Severson B., (2014). *U.S. Navy Installs 3D Printer On Their First Ship, The USS Essex.* [online] Available at: <https://3dprint.com/2554/uss-essex-3d-printer-navy/> [Accessed 1 Apr. 2019].
33. Cheney-Peters S., Hipple M., *Print Me a Cruiser! | Proceedings - April 2013 Vol. 139/4/1,322 (usni.org)*, 2013
34. Asclipiadis A., *Rapid Equipping Force uses 3-D printing on the frontline.* Rapid Equipping Force uses 3-D printing on the frontline | Article | The United States Army
35. L.E. Murr, *Frontiers of 3d printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication*, J Mater Sci Technol, 32 (2016), pp. 987-995
36. Hambling D., *U.S. Army's New Expeditionary 3D Concrete Printer Can Go Anywhere, Build Anything*, Forbes, 2021
37. Yilmaz O., Uglu A., *Shaped Metal Deposition technique in additive manufacturing: A review*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016
38. Clemens M., *Manufacturing May Be Possible on Mars Thanks to 3D Printing*, [Manufacturing May Be Possible on Mars Thanks to 3D Printing - 3Dnatives](#), 2022
39. Goulas A., Friel R.F., *D Printing with moon dust*, February 2016, Rapid Prototyping Journal 22(6):864-870, 2016
40. *3D opportunity for quality assurance and parts qualification*, [DUP 1410-3D-opportunity-QA MASTER1.pdf \(deloitte.com\)](#)

Betül S. Yıldız* 

Bursa Uludağ Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Bursa

Yeni Bir Hibrid Metasezgisel Algoritma İle Drone Kolunun Yapısal Optimizasyonu

Bu araştırmada, insansız hava taşıtlarından bir drone'a ait taşıyıcı kolu optimize etmek için yeni bir hibrit INFO-benzetimli tavlama algoritması (HINFO-BT) geliştirilmiş ve yeni geliştirilen yöntem şekil optimizasyonunda kullanılmıştır. Tasarımın ana amacı, stres kısıtlamalarını ihlal etmeden drone kolunun topoloji ve şekil optimizasyonu ile parça ağırlığı minimize etmektir. Şekil optimizasyonunda amaç ve kısıt fonksiyonlarının denklemlerini elde etmek için hem Latin hiperküp örnekleme metodolojisi hem de kriging meta-modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Optimal tasarım, tüm problem kısıtlarını karşılamakta ve drone kolunun başlangıç tasarımına göre ağırlığı %24.8 azalmıştır. Bu sonuçlar şekil optimizasyonu için önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: INFO Algoritması, Kriging, Tasarım, Drone Kolu, Şekil Optimizasyonu

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25 Mayıs 2023

Kabul: 15 Ağustos 2023

*Sorumlu Yazar: Betül Yıldız

Email: betulyildiz@uludag.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1302774>

Atıf şekli/How to cite: Yıldız B. S., Yeni Bir Hibrit Metasezgisel Algoritma ile Drone Kolunun Yapısal Optimizasyonu. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(2): 74-80.

GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA) askeri ve sivil amaçlar için son yıllarda yaygın şekilde kullanılmaya başlanan hava araçlarıdır. İHA'ların yaygınlaştığı havacılık endüstrisinde, çevre dostu ve maliyet-etkin çözümlere olan ihtiyacı karşılamak için düşük maliyetli ve hafif insansız hava aracı parçalarına olan talep artmaktadır. Havacılık bileşenleri, bölgesel deformasyonlara neden olabilen öngörülemeyen yükler altındadır, bu nedenle havacılık bileşenlerinin tasarım kriterleri belirlenirken istenen özelliklerin belirlenmesi önemlidir.

Drone kolları, havacılık yapılarının kritik bileşenlerinden bir destek bileşeni olarak önemli bir rol oynar. Bir drone kolunun zayıf performansı, tahmin edilemeyen işlevsel sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, drone tasarımında drone kollarının yapısal optimizasyonu, en büyük endişelerden biri haline gelmiştir.

Son zamanlarda, drone bileşenlerini hızlı bir şekilde tasarlamak için yapısal optimizasyon yöntemlerine yönelik yazılım araçlarının kullanımı büyük ilgi görmüştür. Uçuş süresi ve izin verilen faydalı yük, önemli bir faktör olarak kabul edilen İHA yapısının ağırlığına bağlı olduğundan ağırlık

azaltma çalışmaları İHA tasarımında çok önemlidir. Topoloji optimizasyonu, bir yapı için optimize edilmiş bir geometri ve malzeme dağılımı oluşturmak için yaygın olarak kullanılan bir yapısal optimizasyon yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, optimal bir tasarım ve malzeme dağılımı sağlar ve tasarımcılara optimal malzeme dağılımı avantajıyla ürün geliştirme sürecine önceden başlama imkanı sunar.

Örneğin, Yap vd. [1] çalışmasında, ultra hafif mikro-İHA'ların tasarlanması ve üretilmesi için bu topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada seçici lazer sinterleme (SLS) kullanılarak üretilen Naylon 12'nin (PA12) malzeme özellikleri, mekanik testler ve ultrasonik araçlarla doğru bir şekilde karakterize edilerek bu özelliklerin, 3 nokta ve 4 nokta eğilme testlerinin mekanik tepkisi ile ilgili sonlu eleman simülasyonunun karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Çalışmada eklemeli imalat ile topoloji optimizasyonunun mikro-İHA'ların tasarımı ve hızlı prototipleme için güvenli ve güvenilir bir şekilde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Rayed vd. [2] çalışmasında, bir İHA modelinin statik yapısal davranışı, toplam yerdeğiştirmeler ve von-mises gerilmeleri sonlu elemanlar yaklaşımı ile incelenmiştir. Eklemeli imalat ile üretilen İHA yapısının FEA analizi için

Poli Laktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Poliamid (PA) olmak üzere üç farklı polimer malzeme seçilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde sırasıyla pervane muhafazalarında ve yapının tabanında maksimum deformasyon ve maksimum stresin elde edildiğini gösterilmiştir. Araştırma, üç malzemenin de deformasyon ve stresle ilgili ayrıntılarını karşılaştırdıktan sonra, PLA'nın için en iyi malzeme olduğunu da ortaya koyuyor. Ayrıca, topoloji optimizasyon mekanik mukavemetten ödün vermeden kütleli azaltmak ve stresi en aza indirmek için İHA yapısında uygulanmıştır. Optimize edilmiş İHA yapısının titreşim ve yorulma özellikleri incelenmiştir. Palinkas vd. [3] makalesinde ABS ve PLA plastiklerinden 3-d teknolojisi ile geliştirilen drone gövdesinin yapısal optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Nvss vd. [4] çalışmasında topoloji optimizasyonu, parça konsolidasyonu ve eklemeli imalat için tasarımı içeren entegre bir yaklaşımla, yapısal bütünlük gerekliliklerine uyan İHA'nın ağırlık azaltma çalışması yapılmıştır. Yeniden tasarlanan quadcopter yapısı, yapısal, titreşim ve yorulma özelliklerine göre karakterize edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalar modal analiz, hesaplamalı akışkan dinamiği ve rüzgar tüneli testinin birlikte uygulanması, teorik tahminler ile deneysel sonuçlar arasında yakın bir uyum olduğunu ortaya koymaktadır. Monokok quadcopter yapısının montaj ve saha denemeleri, ticari İHA tasarımlarına kıyasla operasyonel üstünlük ve dayanıklılığın iyileştirildiğini doğrulanmıştır.

Şekil optimizasyonu, topoloji optimizasyonu ile elde edilen yapıların optimum tasarım döngüsünde son adımdır. Havacılık endüstrisinde drone bileşenleri için önemli bir araştırma konusudur. Topoloji ve şekil optimizasyonunu içeren tasarım döngüsünün temel amacı, kısıtlamaları göz önünde bulundurarak optimal tasarımlar oluştururken tasarım zamanını en aza indirmektir.

Bugün, optimizasyon mühendislik, işletme, biyoinformatik, ekonomi ve diğer birçok alanda etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Genel olarak, herhangi bir gerçek hayat optimizasyon problemi için çözüm matematiksel bir forma dönüştürmeyi gerektirir. Literatürde farklı optimizasyon yaklaşımları geliştirilmeye devam ediyor. Farklı disiplinlerde optimizasyonun entegrasyonu ve elde edilen etkili sonuçlarla, optimizasyon çalışmalarında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için, özellikle son on yılda, doğadan ilham alan algoritmalar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, problemin doğasından bağımsız olarak ve türev gerektirmeksizin çözümleri bulabildikleri için, makul

bir zaman aralığında kesin bir çözüm bulmanın zor olduğu problemlere uygulanabilir.

Son yıllarda sürü zekası temelli meta-sezgisel yöntemler çeşitli mühendislik problemlerinin optimize edilmesinde popüler hale gelmiştir. Bu nedenle, şekil optimizasyon problemlerinde global optimum tasarımlara ulaşmak için son zamanlarda geliştirilen sürü zekası yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Havacılık endüstrisinden sağlık araştırmalarına kadar çeşitli alanlarda gerçek hayattaki problemlere sürü zekası temelli optimizasyon yöntemlerinin uygulanması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sürü zekası yöntemleri neredeyse tüm tasarım problemlerini etkili bir şekilde çözebilir ve işlev türevleri gerektirmediğinden geleneksel yöntemlerden çok daha başarılıdır [5-18].

Mühendislik tasarım problemlerinin çözümünde daha iyi sonuçlar elde etmek için mevcut algoritmaların zayıflıklarını güçlendiren ve yeni algoritmalar geliştiren hibrit algoritmalar geliştirmeye odaklanmak önemlidir [6]. Daha önce yapılan çalışmalar, örneğin Gupta ve Deep [11-13] farklı meta-sezgisel algoritmaların benzetimli tavlama algoritması [20] ile hibrit edilmesiyle performanslarını artırmıştır. Örneğin, Soh ve Yoo [14] çalışmasında, Harris Hawks algoritması son zamanlarda geliştirilen bir benzetimli tavlama algoritması ile birleştirilerek otoyol bariyerleri için optimum tasarım elde edilmiştir.

Dronlara olan ilginin artmasıyla, optimum tasarımları etkileyebilecek uygun yöntemlerin seçilmesi ve yeni ürün geliştirme süreçlerine önemli katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, INFO optimizasyon algoritmasının performansını artırmak için benzetimli tavlama algoritması ile hibritleştirilmesine odaklanılmıştır. Geliştirilen HINFO-SA algoritması, drone kolunun optimum tasarımı için etkili bir şekilde kullanılmış ve hızlı ve etkili sonuçlar sağlamıştır.

KRIGGING VEKİL MODELİ

Vekil modeller, bilgisayar destekli analiz süreçlerinin çok zaman gerektirdiği durumlarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknikler tasarım optimizasyon problemlerinde optimizasyon problemini oluşturan optimizasyon değişkenleri ve yanıtları arasındaki matematiksel ilişkiyi formüle ederek tasarım optimizasyonunu kolaylaştıran etkili bir çözüm sunmaktadır. Hesaplama süresini azaltırlar ve havacılık başta olmak üzere optimum ürün tasarım süreçlerinin gerekli olduğu endüstrilerde ar-ge çalışmalarında yaygın olarak kullanılırlar. Vekil modeller arasında destek vektör regresyonu (SVR),

yanıt yüzeyi yöntemi (RSM), kriging (KRG) ve radial temelli fonksiyonu (RBF) örnek olarak verilebilir [5]. Vekil modellerin doğruluğu, optimal sonuçların elde edilmesi ve gerçek değerlere yakın sonuçlar vermesi için önemlidir.

Kriging, çıktı değerlerinin rastgele sayılar olduğunu varsayarak eğitim noktaları kümesinden fonksiyonu tahmin eden bir vekil modeldir [5]. Gauss tabanlı fonksiyonlarla temsil edilen korelasyon matrisinin önemli parametrelerini bulmak için eğitilir ve bir çeşit Gauss süreci modelidir.

$$R(t^j, t^k) = \text{Exp} \left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |t_i^j - t_i^k|^2 \right] \quad (1)$$

$$(j = 1 \dots n_g, k = 1 \dots n_g)$$

Burada θ_i parametresi maksimum olasılık yoluyla belirlenir. En etkili yollardan biri, bu tür parametreleri bulmak için bir meta sezgisel uygulamaktır. θ_i için en iyi değerleri elde ettikten sonra, Kriging belirleyicisi şu şekilde bulunabilir:

$$\widehat{y(\mathbf{x})} = \hat{\beta} + r^T(\mathbf{x})R^{-1}(y - \hat{\beta}q) \quad (2)$$

Korelasyon vektörü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$r(t) = [R(t, t^{(1)}), R(t, t^{(2)}), \dots, R(t, t^{(n_g)})]^T \quad (3)$$

INFO OPTİMİZASYON ALGORİTMASI VE BENZETİMLİ TAVLAMA ALGORİTMASI

INFO optimizasyon algoritması, ağırlıklı vektör ortalaması konseptine dayalı bir meta-sezgisel algoritmadır [19]. Diğer populasyon temelli algoritmalar gibi, INFO optimizasyonu da modernleştirme kuralı, vektör birleştirme ve yerel araştırmalar olmak üzere üç temel aşamada uygunluk fonksiyonunun çözümünü bulmayı amaçlar. INFO algoritmasının temel fikri, vektör pozisyonunu ortalama kuralıyla bulmak olduğundan, optimize edici uygunluk fonksiyonu için en uygun ve mümkün olan bir çözüme ulaşır. Modernleştirme kuralı, vektör birleştirme ve yerel araştırmalar olmak üzere üç aşama, alt bölümlerde detaylı olarak tartışılacaktır.

INFO algoritmasının ilk aşaması olan modernizasyon kuralında, vektör pozisyonlarını güncellemek için bir ortalama tabanlı yöntem kullanılır. Bu aşama, konverjans hızını artırmak için üstün bir yakınsaklık geliştirme teknikleri ile desteklenir ve problemin global en iyi çözümüne doğru hızlı bir şekilde konverjans sağlar. Bu aşamanın matematiksel formülasyonu şu şekilde ifade edilebilir [19]:

if $rand < 0.5$

$$z1_i^g = y_i^g + \sigma \times MR + rnd \times \frac{(y_{bs} - y_{a1}^g)}{(f(y_{bs}) - f(y_{a1}^g) + 1)}$$

$$z2_i^g = y_{bs} + \sigma \times MR + rnd \times \frac{(y_{a1}^g - y_b^g)}{(f(y_{a1}^g) - f(y_{a2}^g) + 1)}$$

else

$$z1_i^g = y_a^g + \sigma \times MR + rnd \times \frac{(y_{a2}^g - y_{a2}^g)}{(f(y_{a2}^g) - f(y_{a2}^g) + 1)}$$

$$z2_i^g = y_{bt} + \sigma \times MR + rnd \times \frac{(y_{a1}^g - y_{a2}^g)}{(f(y_{a1}^g) - f(y_{a2}^g) + 1)}$$

end

Denklem 4'te y vektörün mevcut konumunu belirtir ve sırasıyla $z1_i^g$ ve $z2_i^g$ vektörlerin güncellenmiş konumlarını temsil eder. Üst simge g , yeni vektör oluşturma aşamasına karşılık gelir ve rnd terimi [1, NP] aralığında rastgele seçilmiş tamsayılara ($a_1 \neq a_2 \neq a_3$) sahip rastgele bir sayıyı belirtir. Ölçekleme faktörü σ , 5-6 denklemleri kullanılarak hesaplanabilen ortalama oran olan MR ile çarpılır [19].

$$\sigma = 2\alpha \times rnd - \alpha \quad (5)$$

$$\alpha = 2 \times \exp \left(-4 \cdot \frac{g}{Maxg} \right) \quad (6)$$

$$MR = rnd \times WM1_i^g + (1 - rnd) \times WM2_i^g \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, Np$$

Denklem 7 'de, rnd 0 ile 0.5 arasında değişen bir rasgele sayıyı temsil eder. Ayrıca, $WM1_i^g$, ve $WM2_i^g$ farklı jenerasyonlardaki ağırlıklı ortalama faktörleridir. Konverjans hızını artırmak ve vektörü daha iyi bir konuma yerleştirmek için, aşamanın içinde ayrı bir operatör kullanılır. Bu operatör konverjans hızlandırıcısı (COA) olarak adlandırılır ve denklem 8 ile ifade edilebilir.

$$COA = rnd \times \frac{(y_{bs} - y_{a1}^g)}{(f(y_{bs}) - f(y_{a1}^g) + 1)} \quad (8)$$

İkinci aşamada, önceki aşamada belirlenen iki

güncellenmiş vektör konumu ($z1_i^g$ ve $z2_i^g$) yeni vektörler elde etmek için birleştirilir. Bu aşama, algoritmanın vaat eden yerel arama yeteneğini gerçekleştirmeyi ve vektör konumunu daha iyi bir konumla güncellemeyi amaçlar. Yeni oluşturulan vektör, denklem 9'da gösterildiği gibi NV_i^g , olarak temsil edilebilir [19].

```

if rand < 0.5
if rand < 0.5
     $NV_i^g = z1_i^g + \mu \cdot |z1_i^g - z2_i^g|$ 
else
     $NV_i^g = z2_i^g + \mu \cdot |z1_i^g - z2_i^g|$ 
end
else
     $NV_i^g = y_i^g$ 
end

```

Burada, NV_i^g g neslinde güncellenen vektörü ifade eder. μ ise 0.05 rnd ile verilebilir.

Algoritmanın üçüncü aşaması, algoritmanın yerel en iyi çözümlere takılmasını engellemeyi amaçlar. Bu aşamada, eğer $rnd < 0.5$ ise, y_{best}^g alanında benzersiz bir vektör oluşturulur. rastgele oluşturulan sayı rnd 0 ile 1 arasındaki aralıkta değişir. Bu işlem, denklem 10 ile açıklanabilir [19].

```

if rand < 0.5
if rand < 0.5
     $NV_i^g = y_{bs} + randn \times (MR + rnd \times (y_{bs}^g - y_{a1}^g))$ 
else
     $NV_i^g = y_{rnd} + rnd \times (MR + rnd \times (v_1 \times y_{bs} - v_2 \times y_{rnd}))$ 
end
end

```

y_{rnd} aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$y_{rnd} = \phi \times y_{avg} + (1 - \phi) \times (\phi \times y_{bt} + (1 - \phi) \times y_{bs}) \quad (11)$$

$$y_{avg} = \frac{(y_a + y_b + y_c)}{3} \quad (12)$$

Denklem 12' de, y_{avg} , y_{bt} ve y_{bs} üç bileşenin birleştirilmesiyle elde edilen yeni bir bileşeni temsil eder ve ϕ , 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayıdır. Ayrıca, y_{avg} , denklem 9' a göre modellenebilir ve algoritmanın performansını daha da artırmak için, denklem 13-14'e göre iki ek rastgele sayı (v_1, v_2) tanımlanmıştır.

$$v_1 = \begin{cases} 2 \times rnd & \text{if } p > 0.5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$v_2 = \begin{cases} rnd & \text{if } p < 0.5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

p sıfır ile bir arasında değerler alır.

Benzetimli Tavlama Algoritması

Benzetimli Tavlama Algoritması (BTA), metallerin tavlama sürecinden esinlenerek geliştirilen bir optimizasyon tekniğidir [20]. BTA algoritmasında ilk olarak bir başlangıç çözüm noktası ve bir başlangıç sıcaklığı seçilir. Geçerli çözüm noktası (x) ile sonraki nokta (y) arasındaki enerji farkı denklem 15 yardımıyla hesaplanır.

$$dE = E(y) - E(x) \quad (15)$$

$E(x)$, mevcut çözüm noktasındaki enerji fonksiyonu değerini ve $E(y)$, sonraki noktadaki enerji fonksiyonu değerini temsil eder. Eğer dE negatif ise (yeni nokta daha iyi bir çözüm ise), yeni noktayı kabul edilir ve onu yeni çözüm noktası olarak atanır. Aksi takdirde, yeni noktayı kabul etme olasılığı olarak bilinen kabul olasılığı ile kabul edilir.

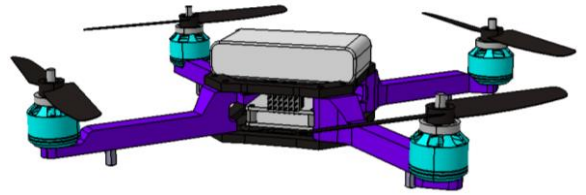
$$P = \exp(-dE / T) \quad (16)$$

Burada T , sıcaklık parametresidir ve P , yeni noktayı kabul etme olasılığını temsil eder.

Soğutma programına göre sıcaklığı azaltılır. Sıcaklık belirli bir değere ulaşıncaya kadar bir başka ifadeyle optimum noktaya ulaşıncaya kadar işlemler tekrarlanır.

YENİ GELİŞTİRİLEN HİBRİD INFO ALGORİTMASI İLE YAPISAL OPTİMİZASYON

Drone kolu, bir drone'un önemli bir bileşenidir ve konumu Şekil 1'de gösterilmiştir. INFO-benzetimli tavlama algoritmasına dayanan hibrit bir yaklaşım kullanılarak bir drone kolunun yapısal tasarım optimizasyonu gerçekleştirilir.



Şekil 1. Drone üç boyutlu modeli

Optimizasyon problemi, çalışma koşullarında uygulanan yükler altında bir gerilim kısıtını karşılayarak yapısal kütleyi en aza indirmeyi amaçlar. Tasarım problemi aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

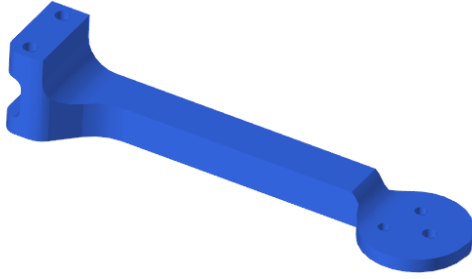
$$\text{Min } F(x) = \text{mass}(x) \quad (17)$$

Kısıtlar:

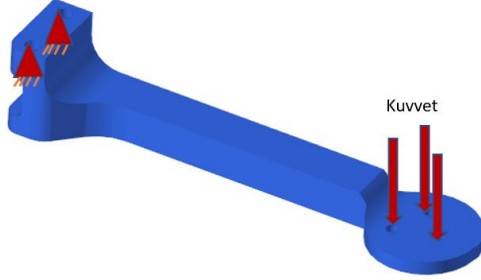
$$\text{stress}(x) \leq \text{stress}_{\text{all}} \quad (18)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1, NDV \quad (19)$$

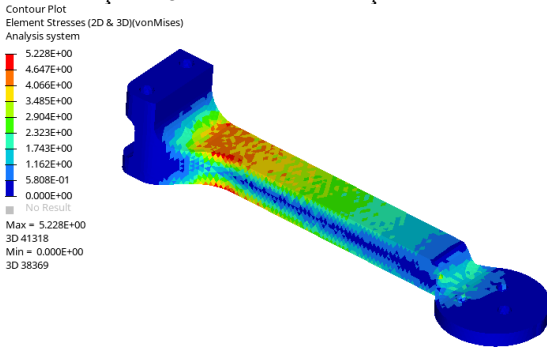
Tasarım probleminin amacı, NDV boyutunda ve x^l ve x^u sınırlarıyla sınırlandırılan bir tasarım vektörü x değiştirilerek yapısal kütleyi minimize etmektir. Bu problemin gerilme kısıtı, çalışma koşullarında uygulanan yükleri ele almak için dahil edilmiştir ve bu problemin maksimum stres sınırı 20 Mpa'dır. Kısıt fonksiyonu, verilen sınır koşulları altında bileşenin maksimum stresi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Drone kolunun dolu ilk tasarımı



Şekil 3. Drone kolu sınır şartları

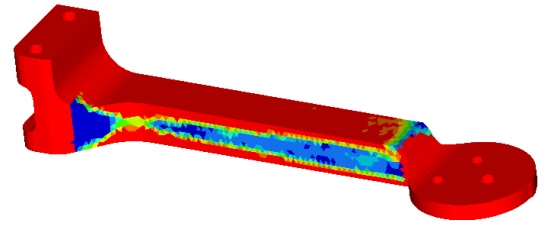


Şekil 4. İlk tasarıma ait gerilme dağılımı

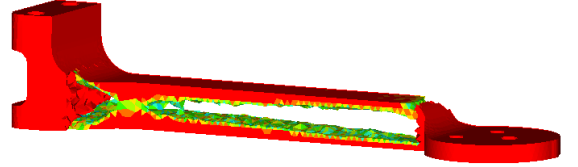
Drone kolunun başlangıç tasarım alanı ve sınır şartları Şekil 2 ve Şekil 3 'te gösterilmiştir. Drone kolunun sonlu eleman modeli 12067 düğüm ve 13615 elemandan oluşmaktadır. Şekil 3 'te, sol deliklerin tüm elemanları boyunca z yönünde bir kuvvet uyguladığı ve sağdaki iki deliğin düğümlerinin tüm serbestlik derecelerinin sabitlendiği görülmektedir. Dolu tasarıma mevcut sınır şartlarında yapılan analiz sonucu Şekil 4' te verilen gerilme dağılımı oluşmuştur.

Drone kolunun topoloji optimizasyon çalışmasında, amaç fonksiyonu olarak komplians azaltma, kısıtlama fonksiyonu olarak ise hacim azaltma tanımlanmıştır.

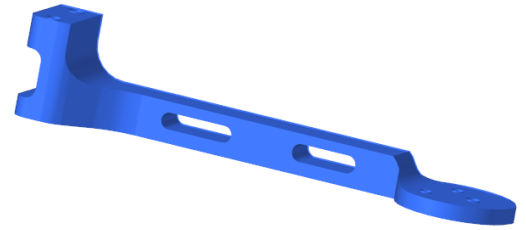
Şekil 5'de sunulan topoloji optimizasyonu sonuçlarına göre, drone kolunun tasarımı yeniden yapılandırılmıştır. Şekil 5'de mavi renkli bölgeler, başlangıç tasarımından çıkarılması gereken malzemeleri gösterirken, kırmızı renkli bölgeler son tasarımda korunacak bölgeleri temsil etmektedir. Şekil 6, drone kolunun yeni tasarımını göstermektedir.



Şekil 5. Topoloji optimizasyonu sonuçları

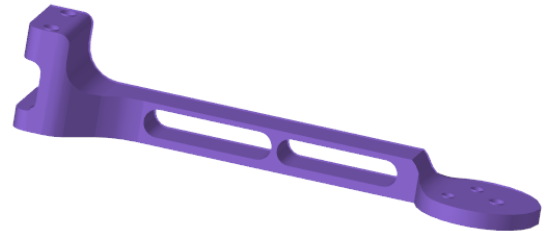


Şekil 6. Yeni tasarlanmış drone kolu modeli

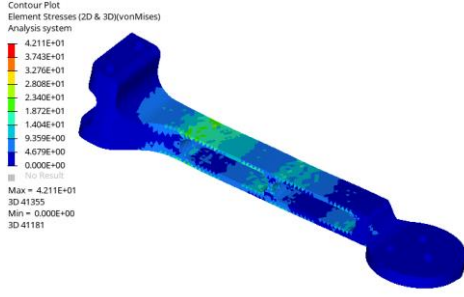


Şekil 7. Tasarım değişkenleri

Drone kolunun şekil optimizasyonunda, Şekil 7' de gösterilen iki adet tasarım değişkeni dikkate alınmıştır. Şekil optimizasyonunda kullanılan tasarım parametrelerinin üst ve alt sınırları şu şekilde tanımlanmıştır: $10 < X1 < 22$ ve $8 < X2 < 20$. Denklem 17-19 kullanılarak bu çalışmada geliştirilen hibrit INFO-BTA algoritmasıyla yapılan şekil optimizasyon adımından sonra drone kolunun optimize edilmiş tasarımı Şekil 8' de, optimum tasarıma yapılan analiz sonrası oluşan gerilme dağılımı ise Şekil 9' da gösterilmektedir.



Şekil 8. HINFO-BTA algoritması kullanılarak elde edilen optimum drone kolu tasarımı



Şekil 9. Optimum tasarıma ait gerilme dağılımı

HINFO-BTA algoritmasının drone kolu problemi için elde edilen sonuçlar Tablo 1' de sunulmuştur. Yapılan optimizasyon çalışması ile drone kolunun ağırlığı başlangıçtaki 81.78 gramdan 61.49 gram'a azalmıştır. Bu da %24.8 ağırlık azalmasına karşılık gelmektedir.

Tablo 1. Drone Kolu Optimizasyon Sonuçları

Yöntem	Ağırlık (gram)	Gerilme (MPa)
İlk tasarım	81.78	5.22
Topoloji Optimizasyonu Sonrası	74.47	11.8
INFO algoritması ile şekil optimizasyonu	68.3	11.8
HINFO-SA algoritması ile şekil optimizasyonu	61.49	42.11

SONUÇ

Bu çalışmanın temel amacı, INFO optimizasyon algoritmasının performansını artırmak ve drone bileşenlerinin optimizasyonunda kullanmak için geliştirmektir. Bu nedenle, bu çalışmanın bulguları, yapısal ürünlerin optimal tasarımının giderek zorlaştığı havacılık endüstrisinde güvenilir ve hafif tasarımlar elde etmek için önemlidir. Çalışma, drone kolunun yapısal optimizasyonunun HINFO-SA ile optimize edilmesini sağlamış ve sonuçlar HINFO-SA'nın diğer yöntemlere göre üstünlüğünü göstermektedir. Sonuçlar da umut verici olup, HINFO-SA'nın diğer endüstriyel problemlerinin çözümü için kullanılabilirliğini göstermektedir. Sonuç olarak, HINFO-BTA hem yapısal optimizasyon hem de gerçek dünya sorunlarını ele almak için en uygun ve sağlam optimizasyon yöntemlerinden biri olarak kullanılabilir.

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE DRONE ARM WITH A NEW HYBRID METAHEURISTIC ALGORITHM

In this research, a new hybrid INFO-simulated annealing algorithm (HINFO-BT) was developed to optimize the drone arm of an unmanned aerial

vehicle, and the newly developed method was used in shape optimization. The main purpose of the design is to minimize the part weight by optimizing the topology and shape of the drone arm without violating the stress constraints. Both the Latin hypercube sampling methodology and the Kriging meta-modeling approach were used to obtain the equations of the objective and constraint functions in shape optimization. The results show that the proposed optimization approach is successful in solving the drone arm design problem. The optimal design meets all the problem constraints and the weight of the drone arm is reduced by 24.8% compared to the initial design. These results show the efficiency of the proposed method for shape optimization.

Keywords: INFO algorithm, kriging, design, drone arm, shape optimization.

KAYNAKÇA

1. Yap, Y. L., Toh, W., Giam, A., Yong, F. R., Chan, K. I., Tay, J. W. S., Ng, T. Y., "Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing", International Journal of Mechanical Sciences, 2023, vol.237, 107771.
2. Rayed, A. M., Esakki, B., Ponnambalam, A., Banik, S. C., Aly, K., "Optimization of UAV structure and evaluation of vibrational and fatigue characteristics through simulation studies", 2021, International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, Vol.12, 17.
3. Palinkas, I., Pekez, J., Desnica, E., Rajic, A., Nedelcu, D., "Analysis and Optimization of UAV Frame Design for Manufacturing from Thermoplastic Materials on FDM 3D Printer", 2021, Materiale Plastice, vol.58(4), pp.238-249.
4. Nvss, S., Esakki, B., Yang, L. J., Udayagiri, C., Vepa, K. S., "Design and development of unibody quadcopter structure using optimization and additive manufacturing techniques", 2022, Designs, vol.6(1), 8.
5. Fang, H., Rais-Rohani, M., Liu, Z., "A comparative study of metamodelling methods for multiobjective crashworthiness optimization", 2005, Computers and Structures, vol.83(25-26), pp.2121-2136.
6. Kurtuluş, E., Yıldız, A.R., Sait, S.M., Bureerat, S., "A novel hybrid Harris hawks-simulated annealing algorithm and RBF-based metamodel for design optimization of highway guardrails", 2020, Materials Testing, vol.62, pp.251-260.

7. Gupta, S., Deep, K., "An efficient grey wolf optimizer with opposition-based learning and chaotic local search for integer and mixed-integer optimization problems", 2019, Arabian Journal for Science and Engineering, vol.44, pp. 7277-7296.
8. Gupta, S., Deep, K., "Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Improved Leadership-Based Grey Wolf Optimizer", 2019, Arabian Journal for Science and Engineering, vol.45, pp.2081-2091.
9. Pholdee, N., Bureerat, S., Yildiz, A.R., "Hybrid real-code population-based incremental learning and differential evolution for many-objective optimisation of an automotive floor-frame", 2017, International Journal of Vehicle Design, vol.73(1-3), pp. 20-53.
10. Gupta, S., Deep, K., "Cauchy Grey Wolf Optimiser for continuous optimisation problems", 2018, Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, vol.30, pp.1051-1075.
11. Gupta, S., Deep, K., "A novel hybrid sine cosine algorithm for global optimization and its application to train multilayer perceptrons", 2019, Applied Intelligence, vol.50, pp.993-1026.
12. Gupta, S., Deep, K., "A novel random walk grey wolf optimizer", 2019, Swarm and Evolutionary Computation, vol.44, pp.101-112.
13. Gupta, S., Deep, K., "A hybrid self-adaptive sine cosine algorithm with opposition based learning", 2019, Expert Systems with Applications, vo.119, pp.210-230.
14. Soh, H. J., Yoo, J. H., "Optimal shape design of a brake calliper for squeal noise reduction considering system instability", 2010, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol.224(7), pp.909-925.
15. Gupta, S., Deep, K., "Hybrid sine cosine artificial bee colony algorithm for global optimization and image segmentation", 2019, Neural Computing and Applications, 1-23. doi:10.1007/s00521-019-04465-6
16. Yildiz, B.S., Mehta, P., Sait, S.M., Panagant, N., Kumar, S., Yildiz, A.R., "A new hybrid artificial hummingbird-simulated annealing algorithm to solve constrained mechanical engineering problems", 2022, Materials Testing, vol.64(7), pp.1043-1050.
17. Karaboga, D., Basturk, B., "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm", 2007, Journal of Global Optimization, vol.39(3), pp.459-471.
18. Mirjalili, S., Gandomi, A.H., Mirjalili, S.Z., Saremi, S., Faris, H., Mirjalili, S.M., "Multi verse Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems", 2017, Advances in Engineering Software, vol.114, pp.163-191.
19. Ahmadianfar, A., Heidari, A., Noshadian, S., Chen, H., Gandomi, A. H., "INFO: an efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors", 2022, Expert Systems with Applications, 116516. doi: 10.1016/j.eswa.2022.116516.
20. Rajendran, I., Vijayarangan, S., "Simulated annealing approach to the optimal design of automotive suspension systems", 2007, Int. J. Vehicle Design, vol.43, pp.1-4.

Tornalanmış Yüzey İmgeleri Gri Ton Ortalama Değerlerinin Takım Aşınması ile İlişkisinin İncelenmesi

Tornalama işlemlerinde takım aşınmasının gerçek zamanlı takibiyle, kesici takımı daha verimli kullanmak ve aşınmaya bağlı ölçü/tolerans ve yüzey hatalarını en aza indirmek mümkün olabilir. Tornalanmış yüzey imgeleri üzerinden yanak aşınmasına dair bir çıkarım ve tahminde bulunmak mevcut yöntemlere bir alternatif olarak bir çok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Bu çalışmada aşınmaya bağlı parlaklık değişiminin gözlemlenmesi amacı ile tornalanmış yüzey imgeleri gri ton ortalamaları bir öznitelik olarak çıkarılmış ve aşınma ile uyum istatistikleri incelenmiştir. Farklı kesme parametreleri ile gerçekleştirilen deneyler sonrası aşınma ile gri ton ortalamaları arasında düşük uyumlu fakat dinamik olarak benzer bir değişim bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tornalama, Takım Aşınması Takibi, Görüntü İşleme

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25 Mayıs 2023

Kabul: 15 Ağustos 2023

*Sorumlu Yazar: Muzaffer Tacettin Küllaç

Email: mtkullac@ktu.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1269179>

Atıf şekli/How to cite: Küllaç M. T., Çuvalcı O., Tornalanmış Yüzey İmgeleri Gri Ton Ortalama Değerlerinin Takım Aşınması ile İlişkisinin İncelenmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(2): 81-88

GİRİŞ

Talaşlı imalat işlemlerinde takım aşınmasının gerçek zamanlı takibi üretim süreçlerinin otomasyonunda önemli bir adımdır. İşlem sırasında belirlenen aşınma miktarında değiştirilemeyen takım; parça hasarlarına, ölçü ve kalite kayıplarına neden olabilmektedir. Belirlenen miktardan önce yapılan takım değişimleri ise takımdan istenilen verimin alınmasını engelleyeceği ve fazladan bekleme süreleri oluşturacağı için maliyet kayıplarına sebebiyet vermektedir. Günümüzde, takım aşınmasının gerçek zamanlı takibi özel sektör ve akademik alanda birçok araştırmacının ortak konusudur.

Tornalama işlemlerinde takım aşınması birçok faktöre bağlı olarak çeşitli şekillerde gelişebilir. Yanak aşınması, krater aşınması, çentik aşınması, plastik deformasyon vb. gibi şekillerde ortaya çıkabilen aşınma türlerinde yanak aşınması, yüzey kalitesi ile doğrudan ilişkisi sebebiyle en çok takip edilen aşınma türüdür[1]. Akustik emisyon, kesme kuvvetleri, titreşim, motor gücü ve sıcaklık sinyalleri ölçümleri günümüzde sıklıkla kullanılan gerçek zamanlı takım aşınması takip yöntemleridir[2-3]. Talaş kaldırma işlemi birçok faktörün rol aldığı karmaşık bir mekanik süreçtir. Talaş-takım temas

yüzeyi, kesme düzlemi ve takım-iş parçası temas yüzeyinden kaynaklı farklılıklar bahsi geçen sinyal yöntemlerinin okumalarını farklı oranlarda etkilemektedirler, bu durum da, takım-iş parçası teması ile oluşan yanak aşınmasının spesifik olarak bu yöntemler ile takip edilebilmesini güçleştirmektedir.

Kesme sırasında oluşan yüzey, kesici takım ucunun negatif replikasıdır ve kesme kenarındaki hacimsel değişimleri yansıtır[4]. Bu bağlamda yüzey parametrelerinin incelenmesi yolu ile kesme kenarlarındaki aşınmaya dair bir izlenim elde edinilebilir. Ayrıca yanak aşınmasının yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan bir ilişkisi vardır. Yüzey pürüzlülüğü artan yanak aşınması ile birlikte genellikle artmaktadır[5]. Yüzeyin yansıtma özelliği ise artan yüzey pürüzlülüğü ile azalmaktadır[6]. Buna bağlı olarak işlenmiş yüzey görüntüleri üzerinden gerçekleştirilen çeşitli doku analizi yöntemleri ile elde edilen dokusal öznitelikler aşınma takibi için kullanılabilirler. Gün geçtikçe gelişen mikroçip üretim teknikleri ile yüksek hızlı görüntü yakalama teknolojileri giderek daha az maliyetli ve daha fazla ulaşılabilir olmaktadır. Uygun bir yüksek hızlı görüntü alma donanımı ile tornalama işlemleri sırasında net yüzey görüntüleri yakalamak mümkün

olabilir. Her ne kadar şu ana kadar literatürde ve özel sektör girişimlerinde yüksek hızlı görüntü yakalama ile gerçekleştirilen gerçek zamanlı bir takım izleme yöntemi geliştirilmemiş olsa bile tormalanmış yüzey görüntüleri üzerinden takım aşınmasını yansıtabilecek öznitelikler ve karar verme algoritmaları birçok araştırmacı tarafından yukarıda bahsedilen sinyal tabanlı aşınma takip yöntemlerine alternatif olarak araştırılmaktadır. Günümüz literatüründe; kenar bulma algoritmaları[7], histogram[8], dalgacık (wavelet)[9], gri seviye eş oluşum matrisi[10], Voronoi mozaikleme[11] ve Fourier dönüşümü[12] gibi çeşitli imge/doku analiz yöntemleri yüzey imgelerinden aşınmayı yansıtabilecek özniteliklerin çıkarılması için kullanılmıştır.

Bir gri tonlama imgede, bir pikselin sayısal değeri o pikselin parlaklığını temsil etmektedir. Dolayısıyla imgenin tüm piksel değerlerinin ortalaması ilgili imgenin parlaklık değerini yansıtan bir öznitelik olarak kullanılabilir. Aynı optik (aydınlatma, odak mesafesi vb.) koşullarında edinilen yüzey imgeleri üzerinden çıkarılacak bu öznitelik ile yüzeylerin birbirine karşı göreceli yansıtma karakteristikleri incelenebilir. Aşınma ile yüzey pürüzlülüğünün değişimi ve dolayısı ile yüzeyin yansıtma özelliğinin değiştiği bilinse de[5-6] şu ana kadar literatürde aşınma ile kıyaslamak üzere gri ton ortalamaları bir öznitelik olarak kullanılmamıştır.

Bu çalışmada farklı kesme parametrelerinde gerçekleştirilen tormalama işlemleri sürelerince aynı optik koşullarda edinilen yüzey imgelerinin gri ton ortalaması değerleri ile yüzeyin oluşumuna karşılık gelen aşınma değerleri karşılaştırılmış ve ilgili özniteliğin aşınma ile uyum istatistikleri incelenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

İş Parçası ve Kesici Takım

Bu çalışmada endüstride yaygın kullanımı ve kolay bulunabilirliği nedeni ile AISI 4140 çeliği iş parçası olarak seçilmiştir. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de gösterilmiştir. Sıcak haddelenmiş, ~102 mm çapında ve 330 mm uzunluğunda hazırlanan AISI 4140 kütükler hadde yüzeyinin temizlenmesi için kaba tormalama işleminden geçirilerek 98 mm çapa düşürülmüşlerdir. Deney kapsamındaki tormalama işlemleri; Goodway marka GLS – 200 CNC tormalama tezgahında, STJCR 25x25 takım tutucu ve TCMT16T308 (MT-TiCN+ Al2O3 +TiN kaplamalı & Talaş kırıcılı) kesici uçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. AISI 4140 Kimyasal kompozisyonu

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Fe %
0.38	0.15	0.75	<=	<=	0.8	0.15	Kal.
0.43	0.35	1.00	0.035	0.04	1.1	0.25	

Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında tormalanmış yüzey imgeleri gri ton ortalamalarının (G) değişen kesme parametrelerinde aşınma ile ilişkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı kesme parametrelerinde 8 adet tormalama deneyi gerçekleştirilmiştir. Das vd. [13] AISI 4140 çeliğinin kaplamalı seramik takımlarla tormalanmasında kesme parametrelerinin aşınma ve yüzey pürüzlülüğü ile olan ilişkilerini incelemiş, parametrelerin aşınmaya olan katkılarını önem sırasına göre; kesme hızı(%25.35), ilerleme oranı(%14.12) ve kesme derinliği(%5.28) olarak bildirmişlerdir. Deneyler kapsamında kesme parametrelerinin çeşitlendirilmesi, takım aşınması üzerindeki etkileri göz önüne alınarak; 5 farklı kesme hızı (Deney 1-5), 3 farklı ilerleme oranı (Deney 3,6-7) ve 2 farklı kesme derinliği (Deney 3,8) olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney 2 ve 4, özniteliğin dinamik değişim davranışını daha detaylı gözlemleyebilmek için tekrarlanmıştır. Deney numaraları ve belirlenmiş kesme parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deney numaraları ve kesme parametreleri

Deney No.	Kesme Hızı - V (m/dk)	İlerleme Oranı - f (mm/dev)	Kesme Derinliği - a (mm)
1	220	0.20	1
2	240	0.20	1
3	260	0.20	1
4	275	0.20	1
5	300	0.20	1
6	260	0.22	1
7	260	0.24	1
8	260	0.20	1.5
2 Tek.	240	0.20	1
4. Tek.	275	0.20	1

Deney Düzenegi ve Fotoğrafların edinimi

Deney düzenegi; CNC Tormalama tezgahı, işlenmiş yüzeyleri fotoğraflamak için kullanılan aparat, kesici takımı fotoğraflamak için kullanılan aparat, aparatlara takılmış iki adet kalem tipi dijital mikroskop ve görüntülerin alındığı diz üstü

bilgisayardan oluşmaktadır. Deney düzeneği Şekil 1’de gösterilmiştir.

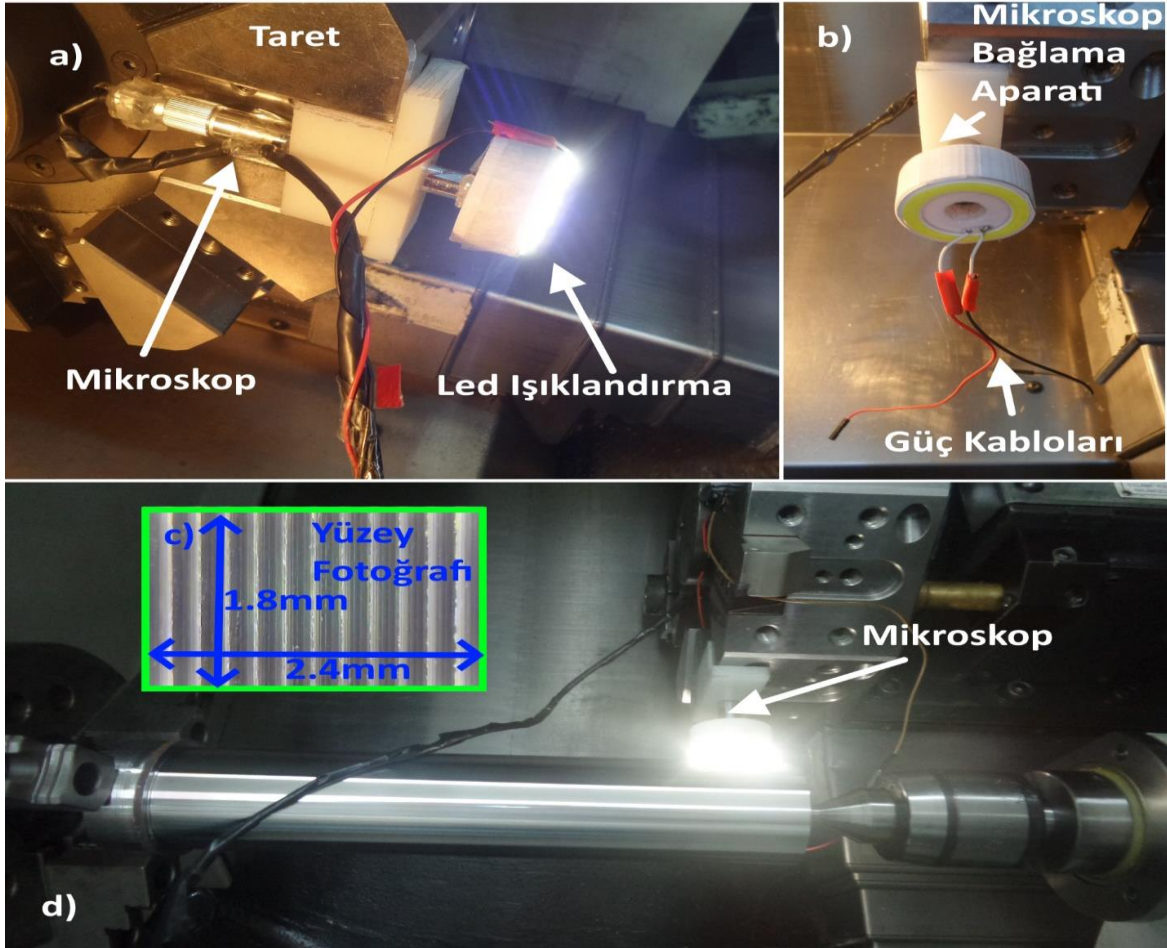


Şekil 1. Deney düzeneği

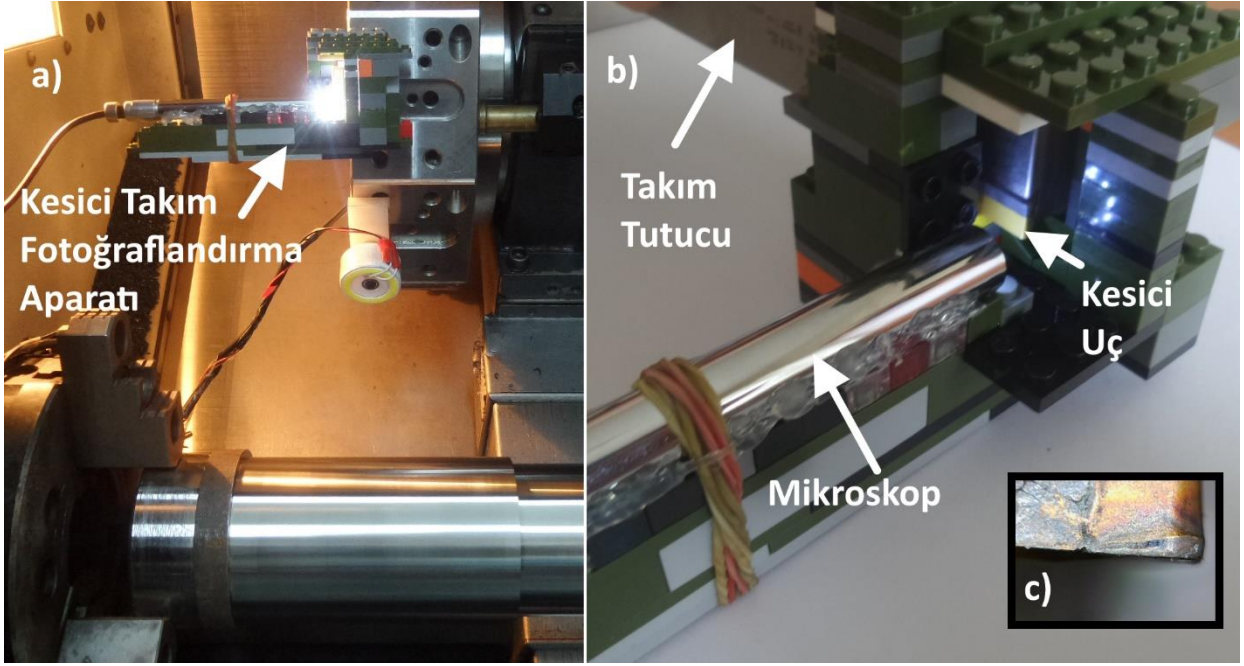
Tornalanan işparçası yüzeylerinin fotoğraflanması için Andonstar 500X (CMOS) dijital mikroskop kamera kullanılmıştır. Mikroskop, bir aparat yardımı ile belirlenen pasolar sonrası taret üzerindeki bir takım istasyonuna iş parçasına dik olacak şekilde yerleştirilmiş ve her seferinde yüzeye 11 mm yaklaştırılarak sabit optik koşullarında yüzeyin 2.4 mm x 1.8mm bir alanı fotoğraflanmıştır. Yüzeyin

ışıklandırılması mikroskop ucuna takılan halka şeklindeki bir led devresi ile yapılmıştır. Yüzey fotoğraflama düzeneği, fotoğrafların edinimi ve örnek bir yüzey imgesi Şekil 2’de gösterilmiştir.

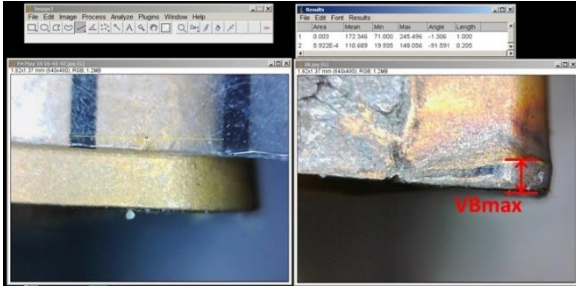
Yanak aşınmasının ölçülmesi yine belirlenen pasolarda takımdan alınan fotoğraflar üzerinden açık kaynak kodlu ölçüm programı “ImageJ” kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri kesici takım kullanılamaz hale gelinceye dek devam ettirilmiştir. Aşınma miktarı olarak maksimum aşınma boyutu (VB_{max}) değerlendirilmiştir. Kesici takımın fotoğraflanması yüzey fotoğraflandırılması için de kullanılan mikroskoptan bir adet daha kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroskop; kesici takımı taretten çıkarmadan fotoğraflayabilmek için özel olarak yapılmış bir aparata sabitlenmiş, aparat paso sonraları takıma takılarak fotoğraf edinimi gerçekleştirilmiştir. İlgili aparat ve kesici takıma takılarak kesici ucun fotoğraflanması Şekil 3’te gösterilmiştir. ImageJ programında gerçekleştirilen kalibrasyon ve aşınma ölçümü Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 2. Yüzey fotoğraflama düzeneğinin yandan görünümü (a), düzeneğin önden görünümü (b), örnek bir yüzey fotoğrafı (c) ve yüzeyin fotoğraflandırılması (d)



Şekil 3. Kesici takım fotoğraflama aparatının taretteki kesici takıma takılması(a), aparatın yakın görünümü(b), örnek bir kesici uç fotoğrafı(c)



Şekil 4. ImageJ programında kalibrasyon ve Aşınma (VB_{max}) ölçümü

Görüntü işleme ve Öznitelik çıkarımı

Bu çalışma kapsamında tormalanmış yüzey imgelerinin gri ton ortalamaları (G) aşınma ile değerlendirilmek üzere bir öznitelik olarak kullanılmıştır.

Bu bağlamda deneyler sırasında edinilen 640 x 480 çözünürlükte RGB yüzey imgeleri ilk olarak OpenCV 4.5.4 C++ kütüphanesi kullanılarak gri ton imgelere dönüştürülmüştür daha sonra ilgili öznitelik her bir imge için Denklem 1'de gösterildiği şekilde C++ dilinde hesaplanmıştır.

$$G = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N m[i, j] \quad (1)$$

Burada;

G- Gri ton ortalama

m- Gri ton matrisi (Gri ton imge)

M- İmgedeki satır sayısı

N- İmgedeki Sütun sayısı

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada tormalanmış yüzey imgeleri gri ton ortalamalarının takım aşınması ile ilişkisi incelenmiştir. Farklı kesme parametreleri ile gerçekleştirilen tormalama işlemleri sırasında edinilen yüzey imgeleri önce gri tona dönüştürülmüş daha sonra piksel değerlerinin ortalamaları(G) hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, karşılık gelen aşınma miktarı(VB_{max}) ile değerlendirilerek ilgili özniteliğin aşınma ile uyum istatistikleri sunulmuştur.

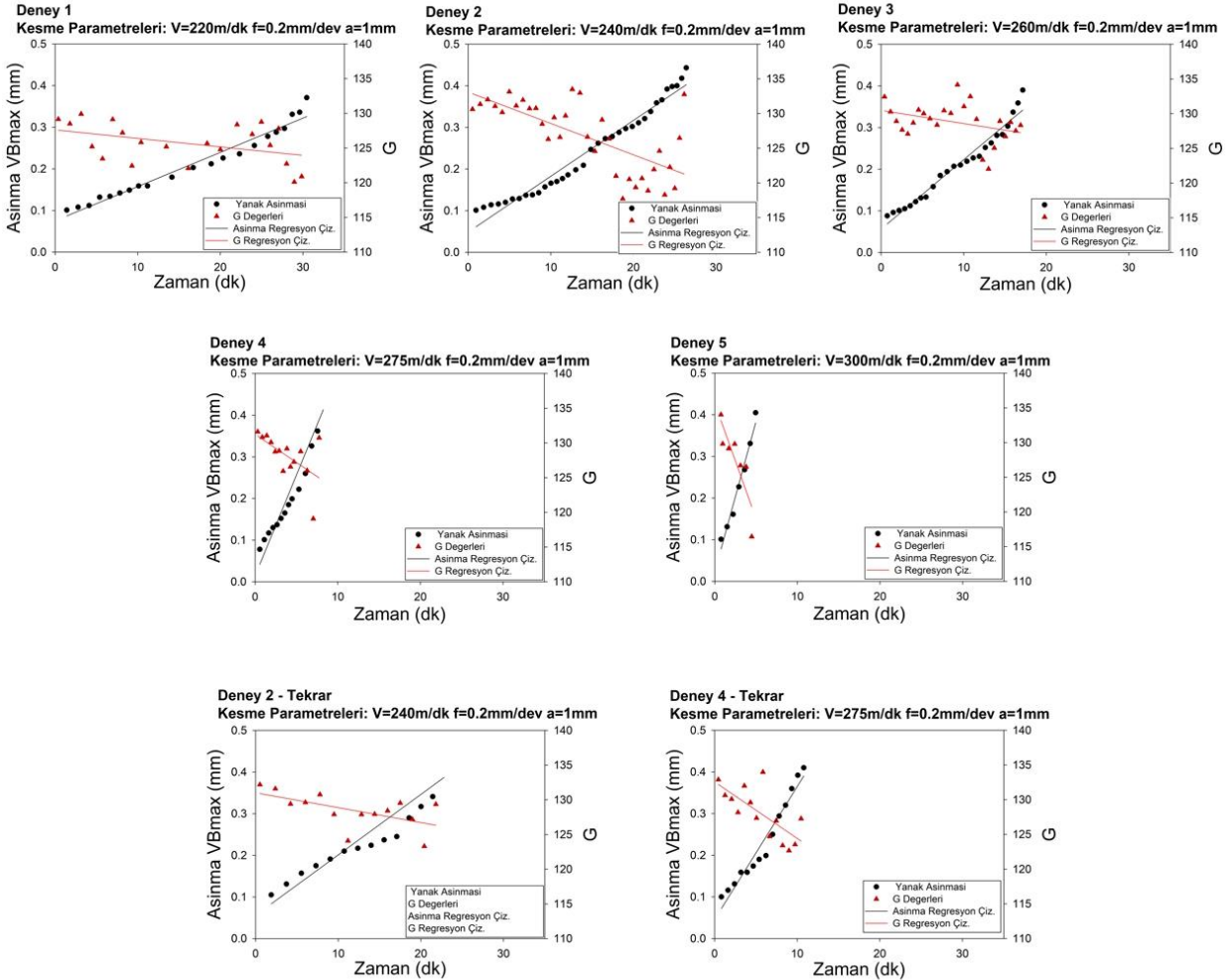
Farklı kesme hızlarında aşınmanın ve G değerlerinin değişimi Şekil 5(a-g)'de gösterilmiştir. Şekil 5(a-e)'de artan kesme hızlarında aşınma ve G değerlerinin değişimi incelenebilir. Beklendiği gibi artan kesme hızlarında takım daha hızlı aşınmış ve takım ömrü azalmıştır. G değerlerinde ise uyum düşük olsa da bir azalma eğilimi söz konusudur. Şekil 5(f,g)'de tekrarlanan deneylerin grafikleri görülebilir. Tekrar deneylerinde daha az görüntü alınmıştır.

Tekrarlanan deneylerde az da olsa asıllarına göre takım ömründe farklılıklar gözlemlenmiştir.

Kesme parametreleri aynı dahi olsa titreşim, paso farklılıkları, iş parçasındaki kalıntılar, yığılma kenar oluşumu vb. faktörler takım ömründe farklılıklara sebep olabilirler. Tekrarlanan deneylerin G değerlerinde ise uyum yine görece az iken genel itibariyle aşınmayla beraber bir azalma gözlemlenmiştir. Değişen kesme hızlarında gerçekleştirilen deneylere ait uyum istatistikleri Tablo 3'te görülebilir. Artan kesme hızlarıyla beraber düzenlenmiş R kare değerinde de artış eğilimi gözlemlenmiştir. Artan kesme hızlarında(Deney 1-5) ortalama düzenlenmiş R kare değeri 0.334492 olarak bulunmuştur.

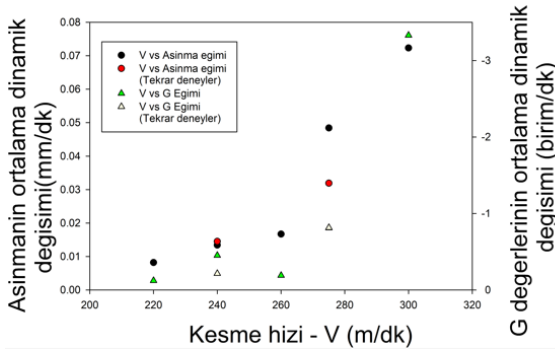
Tablo 3. Artan kesme hızlarında G değerleri regresyon doğrusunun Düzeltilmiş R kare değerleri ve eğimleri

Deney No.	Düz. R ²	Eğim
1	0.135090	-0.12221
2	0.474263	-0.45140
3	0.091098	-0.18999
4	0.280169	-0.81132
5	0.691838	-3.32990
2 Tek.	0.291304	-0.21446
4. Tek.	0.483170	-0.81475
Ortalama (Deney 1-5)	0.334492	



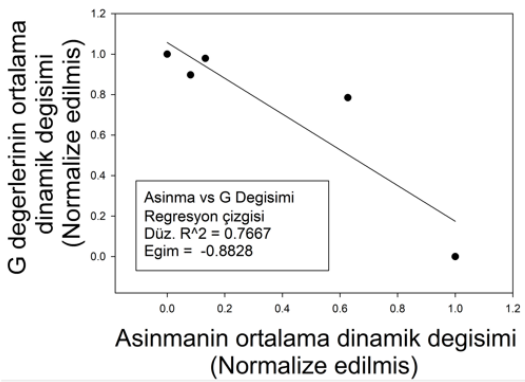
Şekil 5. Değişen kesme hızlarında "Aşınma-Zaman" ve "G- Zaman" grafikleri

G değerlerinin kesme hızına bağlı olarak dinamik değişimlerini incelemek için aşınma ve G değerlerinin eğimleri grafikleştirilmiştir. İlgili grafik Şekil 6'da görülebilir.



Şekil 6. Aşınma ve G değerlerinin kesme hızına bağlı dinamik değişimleri

Şekil 6'daki grafikten aşınma ve G değerlerinin benzer bir artış eğiliminde oldukları görülebilir. İlgili karşılaştırmanın uyum istatistiğini görmek için Deneysel 1-5'e ait eğim değerleri normalleştirilerek "G değerlerinin dinamik değişimi" – "Aşınmanın dinamik değişimi" grafiği oluşturulmuştur. Grafik Şekil 7'de görülebilir.

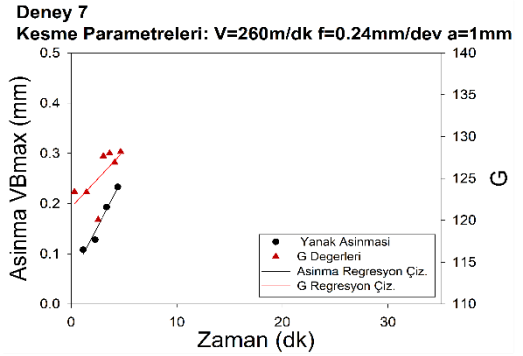
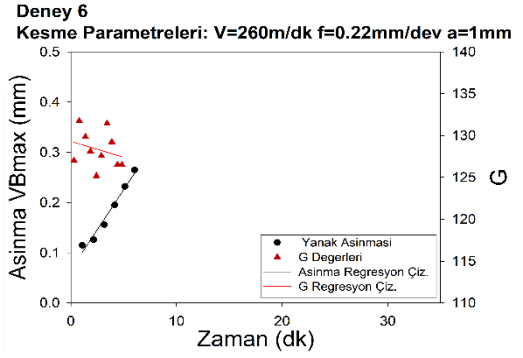
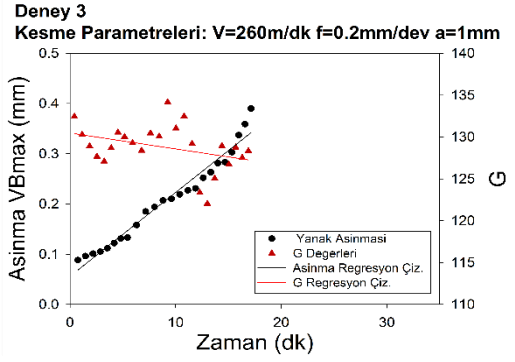


Şekil 7. Normalize edilmiş "G değerlerinin dinamik değişimi" – "Aşınmanın dinamik değişimi" grafiği

İlgili grafiğin regresyon doğrusu oluşturulmuş ve G değerlerinin dinamik değişiminin aşınma ile benzer olduğu gözlemlenmiştir. Grafikten; düzenlenmiş R kare değeri 0.7667, eğim değeri ise 0.8828 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında aşınma ile uyum istatistiklerini incelemek üzere 3 farklı ilerleme oranında deney düzenlenmiştir. Artan ilerleme oranlarında düzenlenmiş bu üç deneyin aşınma-zaman ve G- zaman grafikleri Şekil 8'de görülebilir. Beklendiği gibi, artan ilerleme oranlarıyla beraber takım ömründe bir azalma gerçekleşmiştir. G değerlerinde ise; Deneysel 3 (0.20 mm/dev) ve Deneysel 6 (0.22 mm/dev) da bir azalma eğilimi gözlemlenirken Deneysel 7 (0.24 mm/dev)'de bir artış eğilimi

gözlemlenmiştir. İlgili deneylere ait uyum istatistikleri Tablo 4'te gösterilmiştir.



Şekil 8. Artan ilerleme oranlarında "Aşınma-Zaman" ve "G-Zaman" grafikleri

Tablo 4. Artan ilerleme oranlarında G değerleri regresyon doğrusunun Düzeltilmiş R kare değerleri ve eğimleri

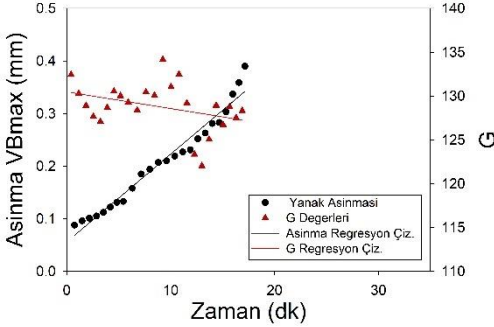
Deneysel No.	Düz. R ²	Eğim
3	0.091098	-0.18999
6	-0.043899	-0.381634
7	0.325789	1.34666
Ortalama	0.124329	

Düzenlenmiş tüm deneyler arasında en düşük uyum oranı -0.043899 düzenlenmiş R kare değeri ile Deneysel 6 için bulunmuştur. Yine düzenlenmiş

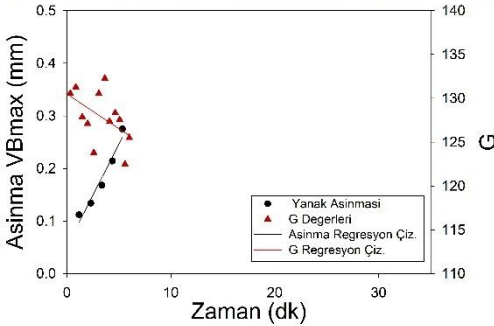
deneysel olarak tek artış eğilimi Deneysel 7’de gözlemlenmiştir. Diğer deneylerin aksine Deneysel 7’de gözlemlenen artış eğilimi düşük uyum değerleri de göz önüne alındığında; veri setinin azlığına bağlı münhasır bir sonuç olabileceği gibi, ilerleme oranına bağlı olarak yüzey dokusundaki tepe ve çukur bölgelerindeki oransal ölçü farklılıklarının bir sonucu da olabilir. Farklı ilerleme oranları ile yapılan deneylerin ve analiz yöntemlerinin çeşitlendirilmesi konu hakkında daha net çıkarımlar yapılmasına yardımcı olabilir.

AISI 4140 çeliğinin kaplamalı seramik uçlar ile tormalanması sırasında kesme derinliğinin aşınmaya ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin görece düşük olduğu bildirilmiştir[13]. Deneylerin çoğunda sabit bir kesme derinliği (1mm) benimsenmiş olsa da ilgili özneliğin (G) değişen kesme derinliğindeki uyumunu da incelemek için bir adet 1.5 mm kesme derinliğinde deney gerçekleştirilerek G değerlerinin kesme derinliğine bağlı olarak da değişimi gözlemlenmiştir. Değişen kesme derinliklerine sahip deneylerin grafikleri (Deneysel 3 ve 8) Şekil 9’da gösterilmiştir. Kesme derinliğindeki artışa karşılık takım ömründe yarıya varan bir azalma gerçekleşmiştir. Deneysel 8 için düzenlenmiş R kare değeri ve eğim sırasıyla 0.48317 ve -0.81475 olarak bulunmuştur. Artan kesme derinliklerinde G değerlerinin ortalama (Deneysel 3 ve 7) düzenlenmiş R kare değeri 0.287134 olarak bulunmuştur.

Deneysel 3
Kesme Parametreleri: V=260m/dk f=0.2mm/dev a=1mm



Deneysel 8
Kesme Parametreleri: V=260m/dk f=0.2mm/dev a=1.5mm



Şekil 9. Artan kesme derinliğinde “Aşınma-Zaman” ve “G-Zaman” grafikleri

SONUÇ

Bu çalışmada tormalanmış yüzey imajları gri ton ortalamalarının(G) farklı kesme parametrelerinde yanak aşınması ile değişimi incelenmiştir. Çalışma kapsamında 8 adet tormalama deneyi gerçekleştirilmiş, deneyler beş adet farklı kesme hızı, üç adet farklı ilerleme oranı ve iki adet farklı kesme derinliği olacak şekilde düzenlenmiştir.

Değişen kesme hızlarında gerçekleştirilen deneylerde G değerlerinin artan aşınma ile beraber bir düşüş eğiliminde oldukları gözlemlenmiş fakat uyum(Düz. R² değerleri) düşük bulunmuştur. Kesme hızındaki artışla beraber uyumda bir iyileşme söz konusu olsa da Deneysel 1-5 ortalama uyum değeri (Düz. R²) 0.334492 olarak bulunmuştur.

Artan kesme hızları üzerinden gerçekleştirilen dinamik değişim analizinde, aşınmanın artan hızlardaki değişim oranı, G değerlerinin değişim oranı ile benzer bulunmuştur. İlgili değerlerin karşılaştırmalı grafiğinden; düzenlenmiş R kare 0.7667 olarak, eğim ise 0.8828 olarak hesaplanmıştır.

Artan ilerleme oranları ile düzenlenen deneylerde(Den. 3,6,7) G özneliğinin ortalama uyum değeri (Düz. R²) 0.124329 olarak bulunmuştur. Deneysel 6, -0.043899 düzenlenmiş R kare değeri ile en düşük uyum gösteren deney olmuştur. Deneysel 3(0.20mm/dev) ve Deneysel 6 (0.22 mm/dev) ‘da artan aşınma ile beraber G değerlerinde bir azalma gözlemlenirken, Deneysel 7 (0.24 mm/rev)’de artış gözlemlenmiştir.

Artan kesme derinliklerinde G değerlerinin ortalama (Deneysel 3 ve 7) düzenlenmiş R kare değeri 0.287134 olarak bulunmuştur.

Değerlendirmeler sonrası aşınma ile gri ton ortalama değerleri arasında düşük uyumlu fakat dinamik olarak benzer bir değişim olduğu sonucuna varılmıştır.

Keywords: Turning, Tool Wear Monitoring, Image Processing

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Trabzon Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesine ve değerli öğretim elemanlarına, deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar için teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Nath, C., “Integrated Tool Condition Monitoring Systems and Their Applications: A

- Comprehensive Review”, *Procedia Manufacturing*, 2020, Volume 48, pp. 852-863.
2. Mohamed, A., Hassan, M., M'Saoubi, R., Attia, H., “Tool Condition Monitoring for High-Performance Machining Systems—A Review.”, *Sensors* 2022, 22, 2206.
 3. Li, X., Liu, X., Yue, C., Liang, S.,Y., Wang, L.,“Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations.”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,2022, Volume 176,103882.
 4. Kassim, A., Mannan, M., Jing, M. “Machine tool condition monitoring using workpiece surface texture analysis.”, *Machine Vision and Applications*, 2000, vol. 11, pp. 257–263.
 5. Ratnam, M.,M., “Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning”, *Comprehensive Materials Finishing*, 2017, vol. 1, pp. 1-25.
 6. Ramamoorthy, B., Radhakrishnan, V., “Statistical approaches to surface texture classification”, *Wear*,1993, vol.167, pp.155-161.
 7. Kassim, A.,A., Mannan, M.,A., ve Mian, Z.,” Texture analysis methods for tool condition monitoring”, *Image and Vision Computing*, 2007, vol. 25, pp. 1080-1090.
 8. Diaz-Saldaña, G., Osornio-Rios, R.A., Cruz-Albarran, I.A., Trejo-Hernandez, M. and Antonino-Daviu, J.A., 2022, October. CNC lathe tool wear analysis using image processing and stray flux. In *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1-6). IEEE.
 9. Dutta, S., Pal, S.K. and Sen, R., 2016. Tool condition monitoring in turning by applying machine vision. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(5).
 10. Bhat, N.N., Dutta, S., Pal, S.K. and Pal, S., 2016. Tool condition classification in turning process using hidden Markov model based on texture analysis of machined surface images. *Measurement*, 90, pp.500-509..
 11. Datta, A., Dutta, S., Pal, S.K. and Sen, R., 2013. Progressive cutting tool wear detection from machined surface images using Voronoi tessellation method. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), pp.2339-2349.
 12. Küllaç, M.T. and Çuvalcı, O., 2023. Correlation statistics of a Fourier transform feature with flank wear on different sections of turned surface images for real time monitoring applications. *Measurement*, 207, p.112399.
 13. Das, S.R., Dhupal, D., Kumar, A., Study of surface roughness and flank wear in hard turning of aisi 4140 steel with coated ceramic inserts, *J. Mech. Sci. Technol.* 29 (10) (2015) 4329–4340.

Erhan Özkan* 

Dikkan Group A.Ş.
İzmir

Kelebek Vanaların Simülasyon Destekli Deney Düzeneği Tasarımı ve Prototip Üretimi

Vana sektöründe tesisatların çabuk açılıp kapanmasını sağlamak ve bu şekilde su ve enerji kaybını azaltmak amacıyla tasarlanan kelebek vanalar isimlerini klape ve milin yerleşim şekillerinden almaktadır. Yaygın olarak kullanılan sfero döküm klape malzemelerin düşük korozyon direncini arttırmak amacıyla rılsan veya epoksi kaplama gibi alternatif yöntemlere başvurulsa da bu opsiyonlarla istenilen korozyon dayanıma ulaşmak mümkün olmamakla birlikte vananın sızdırmazlık fonksiyonlarını da tam olarak yerine getiremediği tespit edilmiştir. Korozyon direncini arttırmak ve sızdırmazlık fonksiyonlarını iyileştirmek amacıyla kullanılan paslanmaz çelik klape ise uzun tedarik süreleri, yüksek maliyetleri ve talaşlı imalat işleme zorlukları sebebiyle çok tercih edilememektedir. Bronz klape düşük maliyetleri, kısa termin süreleri ve kolay talaşlı imalat özellikleri sebebiyle kritik bir öneme sahiptir. Diğer yandan sfero dökme demir gövde malzemelerinin korozif ortam ile temas eden kısımlarının kauçuk malzeme ile kaplanarak korozyon dirençlerinin artırılması ve sızdırmazlık fonksiyonlarını yerine getirmesi de sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada literatürde ilk defa Lug-Wafer tipi kelebek vanaların sfero dökme demir gövde tasarımı, bronz klape sıcak dövme yöntemi ile üretiminin simülasyon destekli tasarımları ile prototip üretim aşamaları ele alınmış, uygulamada ise özgün bir gövde tasarımının ve klape temas yüzeylerindeki sızdırmazlığı sağlamak amacıyla plastik pres ile EPDM kaplama ölçülerinin ıslak tork etkileri deney tasarımı ile araştırılmış ve sistemin optimum ıslak tork değeri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kelebek Vana, Simülasyon Destekli Tasarım, Bronz, Islak Tork

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 1 Şubat 2023

Kabul: 16 Kasım 2023

*Sorumlu Yazar: Erhan Özkan

Email: erhanozkan81@icloud.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1245809>

Atıf şekli/How to cite: Özkan E., Kelebek Vanaların Simülasyon Destekli Deney Düzeneği Tasarımı ve Prototip Üretimi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(2): 89-98

GİRİŞ

Güncel araştırmalara göre su tüketiminin yıllık 800 m³/kişi oranında olduğu tespit edilmiştir. 1,4 milyar insan içme suyundan yeterli oranda faydalanamamaktadır bu da toplam dünya nüfusunun %20'si oranına tekabül etmektedir. 2,3 milyar insan ise içme suyundan tamamen mahrum bir şekilde yaşamlarını sürdürmeye gayret etmektedir. Araştırma sonuçlarına göre 2050 yılına gelindiğinde içme suyu konusunda sorun yaşayacak ülkelerin sayısının 54'e ulaşacağı ve bu şartlarda yaşamını sürdürmek zorunda kalacak kişi sayısının 3,76 milyara kadar yükseleceği ön görülmektedir. Buna göre 2050 yılında 9,4 milyar insan olması beklenen dünya nüfusunun yaklaşık %40'ı içme suyundan faydalanamayacak anlamı çıkmaktadır. Bu durumda

su kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması ve su israfının önüne geçilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu amaçla akışkan taşıma ve depolama sistemlerinde su kaybının minimum seviyelere indirilmesi zorunludur. Bunu sağlamak amacıyla tasarlanan vana sistemlerinde korozyon direncinin artırılması büyük önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde korozyon kayıplarının gayri safi milli hasılamızın %5'i mertebelerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu kayıpların da %50'si önlenbilir nitelik taşımaktadır. Parça tasarımının doğru yapılması ile boşluk ve yarık korozyonu, doğru malzeme seçimi ile galvanik ve üniform korozyon, doğru yüzey işlemleri ile çukurcuk ve kazımalı korozyon, doğru mekanik aksamaların sisteme adaptasyonu ile gerilmeli ve

yorulmalı korozyon hasarları engellenebilir. Bunu önlemek amacıyla yaygın olarak kelebek kullanılan vanalarda Ar-Ge çalışmaları hız kazanmıştır. Kelebek vanalar ismini mekanik aksamalarının şeklinin kelebeğe benzemesinden almaktadır. Vanaların iç ve dış çapları birbirine çok yakın olmaktadır, bu yakınlıktan dolayı akış kontrolü bir disk ve dikey eksenli boyunca da mil ile desteklenerek tasarlanmıştır. Suyun tasarrufunu sağlayabilmek adına iki yönlü akışa izin verecek şekilde geliştirilmiştir [1-3].

Boru sistemleri için uygun vananın seçilmesi, enerji ihtiyacının azaltılmasında önemli rol oynamakta dolayısıyla işletme maliyetinin de düşmesini sağlamaktadır. Açma-kapatma kontrolü, akış hızının modülasyonu, sistem geri akışın önlenmesi ve basınç tahliyesi gibi güvenlik cihazları için çeşitli vanalar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan vanalardan bir tanesi olan kelebek vanaların temel amacı akış hızını düzenlemektir. Sistem içerisindeki akış özellikleri ile kelebek vanaların içerisindeki akış farklı davranışlar sergiler. Bunun sebebi ise kelebek vanalardaki klapelerin hareket edebilir olmasıdır. Bir kelebek vananın performansı, klape açıklığından doğrudan etkilenmektedir [4-7].

Karakteristiği lineer akış olarak tasarlanan vanalarda stroktaki en ufak bir değişiklikte vananın pozisyonuna bağlı olmadan akışkanda eşit değişimler meydana gelmektedir. Bu karakteristiğe sahip vanaların kullanım yerleri genellikle kayıp basınçların vananın boyu oranında gerçekleştiği uygulama sistemleridir. Lineer akış karakteristiğine sahip vanalar tüm strok değerlerine göre oransal karakteristiklere kıyasla daha iyi bir akış kapasitesine sahiptirler [8,9].

Kelebek vanalar akışkan sistemlerin kontrol parametrelerinde belirlenen zaman içerisinde akışkanın hareketini engellemek üzerine tasarlanmıştır. Vanadaki olası bir hasar sızıntı, malzeme kontaminasyonu ve kaybı ile patlama risklerini barındırmaktadır. Daha da önemlisi sistemdeki sızıntılar zehirlenme ve yangın gibi tehlikeli durumların meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Metal-metale sızdırmazlık yüzeylerine göre çalışan sistemlerde yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebiyle ideal seviyede sızdırmazlığı sağlamak çok kolay değildir. Bu sebeple metal yüzeyleri elastik malzemeler ile kaplanmak suretiyle sızdırmazlık elde edilmektedir. Bu malzemelerin dezavantajı ise sıcaklık, akışkan pH'ı ve içeriğine göre yaygın bir uygulama alanına sahip olmamasıdır. Sızdırmazlığı sağlayan bileşenlerin uygulama basıncı ve sıcaklığında yükler altında deformasyona uğramaması beklenmektedir [10].

Kelebek vana, çeyrek tura göre çalışan vanaların grubunda yer almaktadır. Genellikle merkezden veya kullanım amacına göre eksantrik olarak yataklanan bir diskin akışkanın geçeceği alan içerisinde 90° dönecek şekilde akışkan hareketini engelleme prensibiyle çalışmaktadır. Akışkanın geçtiği borunun merkezinde daire şeklinde bir plaka bulunmaktadır. Kullanım alanına ve yüküne göre bu plaka manuel veya aktüatör yardımıyla akışı engellemek adına dik, akışı sağlamak adına da paralel konuma getirilir. Akışkan hızını ayarlayabilmek amacıyla vana küçük oranlarda da açılabilir. Bu kontrolü sağlamak amacıyla klape 15°-75° aralığında hareket ettirilmektedir.

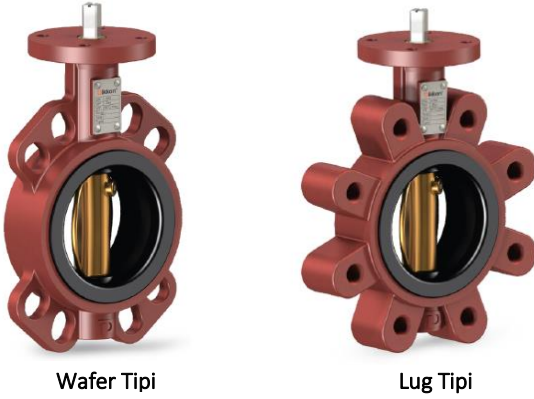
Kelebek vanaların uygulamadaki en büyük avantajı boyutlarına kıyasla çok yüksek debi değerleri sağlamasıdır. Bu konu özellikle alan sıkıntısı yaşanan kimyasal akışkanların kontrolünde önem taşımaktadır. Temizliğin zor olması ve hassas toleranslarda kontrol edilememesi bu vanaların dezavantajıdır. Bu sebeple gıda, tıbbi atık ve hijyenik taşıma sistemlerinde kelebek vanaların kullanılması çok uygun değildir. Yaygın olarak kimyasal içeren akışkanlar, atık su ve dağıtım şebekelerinde kullanılmaktadır [11].

Kelebek vanaların gövde malzemesi çoğunlukla pik ve sfero dökme demir, çelik, paslanmaz çelik olmakla birlikte bakır, pirinç, bronz gibi alaşımlar da tercih edilmektedir. Titanyum ve alüminyum gövde malzemeleri yüksek maliyetleri sebebiyle çok yaygın olarak kullanılmamaktadır. Son zamanlarda ise polivinilklorür (PVC) ve polipropilen (PP) gövde malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Metal gövdelerde sızdırmazlık sağlamak ve gövdelerin korozyon direncini arttırmak amacıyla; etilen propilen kauçuk (EPDM), politetrafloroetilen ticari ismiyle TEFLON (PTFE) ve nitril kauçuk bütadien (NBR) kaplama malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Bu elastomer malzemeler aynı zamanda yüksek sıcaklık ve basınç altında vananın görevini sağlıklı bir şekilde yerine getirmesi amacıyla tercih edilmektedir. Bu malzemelerden EPDM çok geniş bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte -50 +150 °C çalışma sıcaklıklarında kimyasal olarak kararlılığını koruması sebebiyle kelebek vanalarda da çokça tercih edilmektedir.

Fosfat, keton, soğuk ve sıcak su, hidrolik akışkanlar, alkaliler ve ester içeren akışkanlara karşı direnci oldukça iyi olan EPDM oksijen, ozon ve açık hava koşullarında kararlılığını korur ancak benzin, gaz yağı ve çoğu yağa karşı direnci ise oldukça düşük seviyelerdedir. EPDM' in elektriksel özellikleri ve düşük sıcaklıklarda dahi elastikliğini koruması ile diğer elastomerlere kıyasla düşük maliyetleri başlıca avantajlarıdır. Düşük hidrokarbon direnci, çok yüksek sıcaklıklarda yapısının bozulması ve düşük

alev direnci ise dezavantajları arasında gösterilebilir [12-14].

Genel olarak kelebek vanaların gövde kısımları sfero dökme demir malzemeden üretilip sızdırmazlığı sağlamak amacıyla çoğunlukla EPDM kauçuk malzemesi ile kaplanmaktadır. Borulara montajı Lug ve Wafer olmak üzere farklı bağlantı tipleri ile yapılabilir. İki flanşın birleşme noktalarına monte edilen Wafer tip bağlantının hattın sonunda kullanılması uygun değildir. Lug tip bağlantıların isimleri ise bağlantı kulaklarına verilen lug adından gelmektedir. Kulakların içerisinde dişliler bulunmaktadır. Bu tip vanaların flanşlarındaki delik sayısı ile kulak sayısı eşittir. Tesisatların ve sistemlerin her noktasında kullanılabilmesi mümkün olup hattın sonunda kullanılabilmesi ise Wafer tipe göre avantajdır [15-17]. Şekil 1'de Lug ve Wafer tip kelebek vanaların görselleri yer almaktadır.



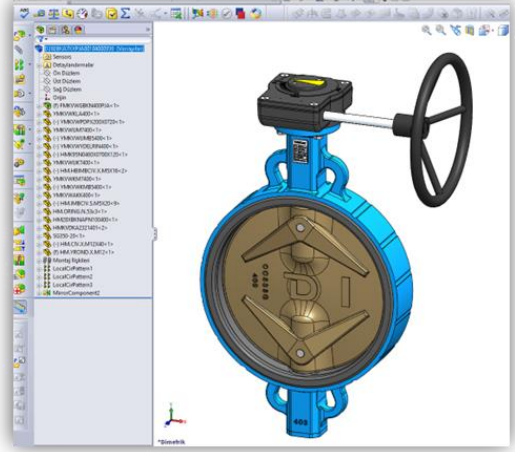
Şekil 1. Wafer ve Lug tipi kelebek vanalar

MATERYAL VE METOT

Bu makale kapsamında uzun soluklu bir literatür taraması yapılmış ve geniş bir mukayese çalışması yürütülmüştür. Modele ait başta DIN 3354 standardı olmak üzere, petrol sektörü taleplerini karşılayacak parçayı tasarlamak adına API 609 ile BS 5155 ve ANSI/AWWA C504-80 standartları detaylı bir şekilde araştırılmış, mevcut sektörel yenilikler incelenerek fikir havuzu oluşturulmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda model standart gerekliliklerini karşılayacak şekilde genel tasarım hatları çizilerek Solidworks tasarım yazılımı ile öncelikle 3D çizimler oluşturulmuştur. Şekil 2'de Wafer tip modelin ana tasarımı gösterilmiştir.

Gövde, EN-GJS 400-18 LT standartları gerekliliklerini sağlayan ve GGG 40.3 olarak da bilinen malzemeye uygun şekilde tasarlanmıştır. Ferritik mikroyapıya sahip olan GGG 40.3 malzeme ihtiyaç duyulan mekanik özellikleri sağlayacak niteliktedir. Bu mekanik özellikleri elde etmek için tam ferritik mikro yapının oluşmasını sağlamak esas

amacı oluşturmaktadır. Ostenit içerisinde çözünmüş halde bulunan karbonun küresel yapıda grafitte dönüşmesi için difüzyon zamanına ihtiyaç duyulmaktadır. Küresel yapıdaki grafit ise parça tokluğunu arttırıcı etkide bulunmaktadır. Karbonun ostenit fazından ferrit içerisinde homojen bir şekilde dağılması için gerekli analiz ve mikro yapı edilmelidir. Tablo 1'de GGG 40.3 malzemesine ait kimyasal analiz değerleri yer almaktadır. Bu analiz değerlerine tekabül eden mekanik özellikler tespit edilerek parçanın simülasyon çalışmalarına yön verilmiştir.



Şekil 2. Modele ait tasarımların çizimi

Tablo 1. Gövde Malzemesi Olarak Seçilen GGG 40.3'ün Kimyasal Analizi

Element (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu
Olması	3,75	1,40	Ma	Max	0,009	Ma
Gereken	-	-	x	0,04	-	x
	3,85	1,50	0,1		0,015	0,1
			0			0
Ölçülen	3,81	1,44	0,05	0,002	0,001	0,21

Klape malzemesi olarak EN 1982 CuSn10-C (CC 480K) seçilmiştir. Bu malzemenin kimyasal analizi Tablo 2'de belirtilmiştir. Modelin mekanik özellikleri ise bu kimyasal analizlere göre belirlenerek ANSYS simülasyon programında mekanik dayanım aralığındaki karakteristikleri gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Klape Malzemesi Olarak Seçilen CuSn10'un Kimyasal Analizi

Element (%)	Cu	Sn	Mn	Pb	Zn	Sb
Olması	88-	9-	Max	Max	Max	Max
Gereken	90	11	0,10	1	5	0,2
Ölçülen	89,0	10,2	0,02	0,05	4,71	0,10

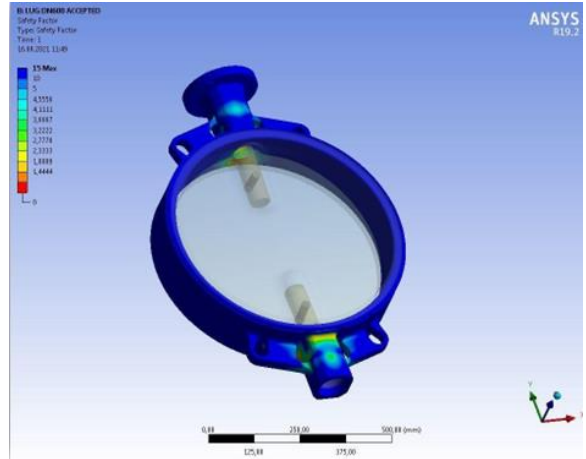
Gövdenin korozyon direncini arttırmak ve sızdırmazlığı sağlamak amacıyla ASTM D2000 M1BA407 EPDM malzeme kullanılmıştır. Bu malzemenin ASTM D1056, ASTM D2240 standartlarına göre 35-45 Shore A sertlik, ASTM D412 standardına göre 1050 PSI çekme mukavemeti ve %400 uzama değerlerine sahip olması beklenmektedir. Şekil 3'te gövde, klape ve sızdırmazlık için seçilen kauçuk malzemelerin ayrıştırılmış halleri yer almaktadır.



Şekil 1. Wafer Tip Kelebek Vana Tasarımların Ayrıştırılmış Hali a) GGG40.3 Sfero Gövde b) EPDM Kauçuk Kaplama c) CuSn10 Klape

Solidworks'te gerçekleştirilen tasarım aşamasının tamamlanmasını takiben tasarım doğrulama aşamasına geçilmiştir. Tasarım doğrulama aşamasında öncelikle ANSYS statik analiz modülüyle, EN 1074 standartlarında tanımlanan tekil ve montajlı olarak iki farklı sayısal yöntemle ele alınmış ve Rayleigh-Ritz metodu ile interpolasyon çözümü gerçekleştirilmiştir. Standartta belirtilen sınır koşulları aynen uygulanmış ve gövde parçası için nominal basınç değerinin bir buçuk katı, klape parçası için nominal basınç değerinin yüzde on fazlası olarak tanımlanmıştır. Bu aşamadan elde edilen sonuçlar ile optimum et kalınlıkları belirlenmiş ve bu sayede tasarım tanımlanmadan olası problemlerin görülmesi sağlanarak tasarım üzerinde önlemler alınmıştır. Şekil 4'te yer alan gövde mekanik analizleri ile güvenli malzeme aralığı test edilmiştir. Gövde test basıncının bir buçuk katı olan mertebelere dayanımı tescil edilerek gövde malzemesinin uygunluğu teyit edilmiştir. PN 10 sınıfında yer alan parça için 15 Bar maksimum basınç

değeri baz alınmış ve bu değere göre güvenlik katsayıları tespit edilmiştir.

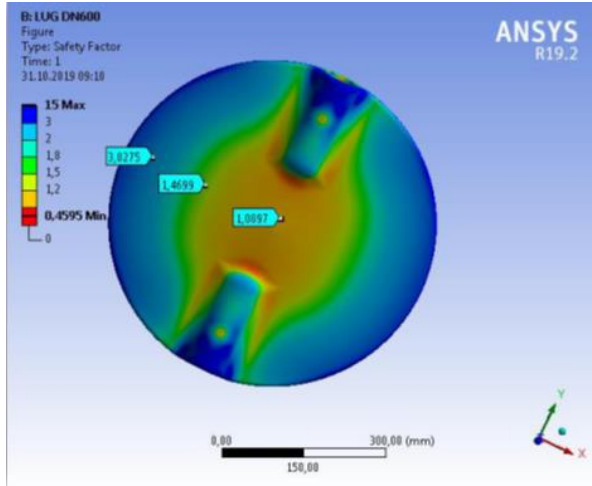


Şekil 2. Gövde mekanik analizleri

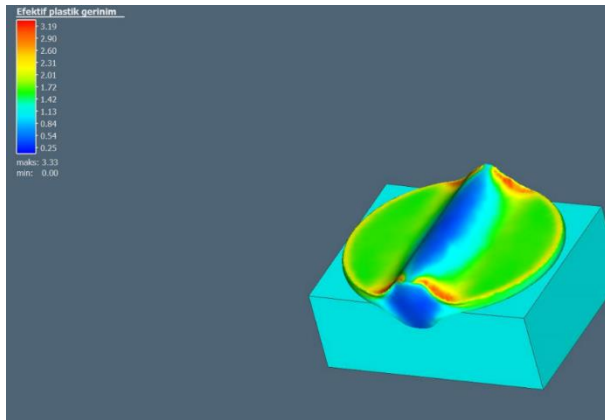
Gövde malzemelerinin gerilmelerinin yanında akış debisine göre farklı yüklerle maruz kalacak olan klapelelerin ANSYS mekanik simülasyon sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir. EN 1267:2012 (E) standardına göre akış katsayısı ve basınç kayıp katsayısı formülleri tanımlanmıştır. TS EN 1267 akış direnci deney standardına göre Solidworks çizim programında vana tam açık pozisyonda olacak şekilde modellemesi yapılmıştır. Döküm yöntemi ile üretilmesi planlanan klapelelerin mekanik analiz sonuçlarına göre özellikle orta kısımların yüksek gerilmelere maruz kalması sebebiyle olası hasarların önüne geçmek amacıyla döküm yöntemi ile klape üretilmesinin sakıncalı olacağı kararına varılmıştır. Bronz klapelelerin korozyon hızı ve düşük maliyetleri sebebiyle yine CuSn10 malzeme üzerinde gerçekleştirilebilecek modifikasyonlar ve varyantlar ile ilgili alternatif üretim tekniklerinin araştırılması gerçekleştirilmiştir. 240 MPa akma mukavemeti değerleri ele alınarak gerçekleştirilen klape malzemeleri için nominal basıncın yüzde on fazlası sınır koşul tanımlanarak mekanik sayısal analiz yöntemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre 16 barlık maksimum çalışma basıncının 1,1 katına denk gelen 18 bara göre klape mekanik analizi Şekil 5'te gösterilmiştir.

Klape ile milin birleşim noktalarındaki gerilmeler ile klape gövdesinde yer alan birleşim noktalarındaki olası hasarları önlemek, üretim ve bakım maliyetlerini düşürmek amacıyla klape malzemesini döküm yoluyla üretmenin tespit edilen risklerini önlemek ve parça ömrünü arttırabilmek adına klape malzemelerini sıcak dövme ile üretim yöntemi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sıcak dövme prosesinde model ve kalıp tasarımı yapılırken hammadde çapı, parça operasyon geçişleri, ekstrüzyon-redüksiyon oranı, parçanın boyu, yağlayıcı yapısı ve kullanımı vb. özellikler kritik

öneme sahiptir. Bu parametreler kalıp ömürlerine etkiyerek, kalıp hasarlarına ve kırılmalarına sebebiyet vermektedir. Bu ve bunun gibi ölçütler dikkate alındığında sıcak dövme prosesinin optimum ekonomik fayda elde edecek şekilde tasarlanmanın gerekliliği büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle, maksimum faydayı sağlamak amacıyla Simufact Forming sayısal simülasyon destekli yazılımdan faydalanılmıştır. Şekil 6'da gerçekleştirilen dövme simülasyon görseli yer almaktadır.



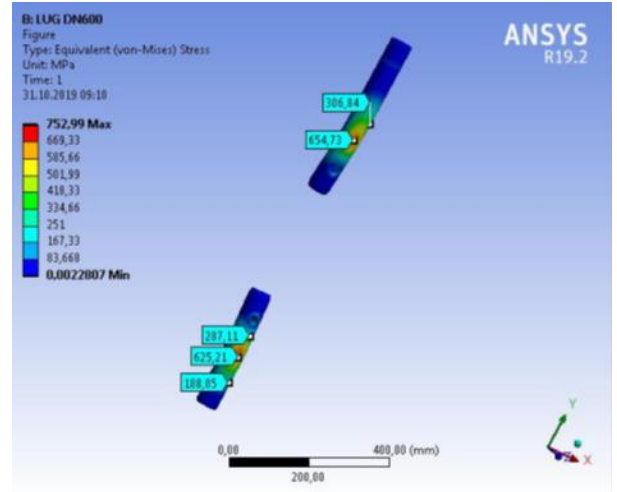
Şekil 3. Döküm klape mekanik analizi



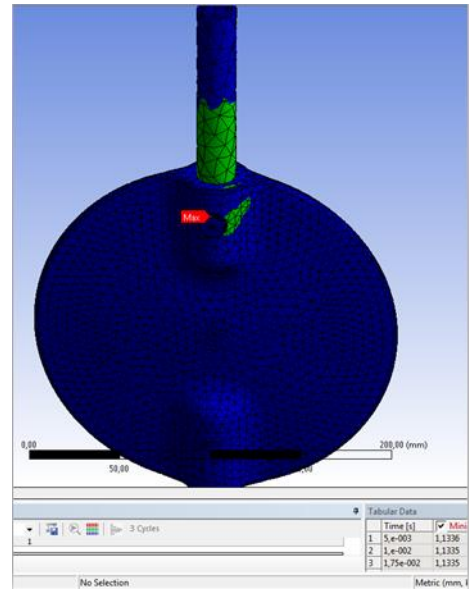
Şekil 4. Simufact Forming dövme programı klape analizi örneği

Döküm gövde üzerindeki mekanik yükler gerekli olan maksimum gerilme değerini sağlamaktadır. Burada önemli olan klape ve mil malzemesinin birleşim noktalarındaki mekanik davranışların analiz edilmesidir. Klape ve milin birleşim noktasındaki değerler yine klape üzerine gelecek olan 10 Bar'lık basıncın bir buçuk katı olan 15 Bar'a göre analiz edilmiş ve buna göre gerekli olan hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de

klape ve mil birleşim noktalarının ANSYS mekanik analizi gösterilmiştir.



Şekil 5. Mil mekanik analizi



Şekil 6. Klape ve mil birleşimine ait mekanik analiz

Gövde, klape ve mil malzemelerinin analizleri gerçekleştirildikten sonra bu malzemelerin tasarımı geçerli kılmak için prototip imalatı aşamasına geçilmiştir. Önce gövde döküm ve üretim süreçlerindeki yeni teknolojiler tasarımların gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle döküm süreçlerinde, kullanılan modellere şekil verilirken bilgisayar kontrollü tezgahların kullanılması, dolayısıyla döküm parçaların tasarımının akışkana uygun bir yapıda şekillendirilmesinde etkin bir rol oynamaktadır. Tasarlanan döküm modeli teknik resimlerine göre gövde model ve maça sandıkları hazırlanmıştır. Şekil 9'da gövdeye ait döküm modeline ait resim yer almaktadır.



Şekil 7. Prototip imalat gövde döküm model

Şekil 10'da dökümü gerçekleştirilmiş gövde malzemelerin işlenmemiş görselleri yer almaktadır.



Şekil 8. Lug (Wafer) gövde döküm

Gövde dökümü ile simülasyon verilerinin uyumu sonrasında klape üretimi aşamasında geçilmiştir. Klape döküm yöntemi ile gerçekleştirilen modellerinde yaşanılması ön görülen problemler prototip imalatında da aynı şekilde tespit edilmiştir. Şekil 11'de klape parça için hazırlanmış olan döküm modeli, Şekil 12'de ise bu model kullanılarak gerçekleştirilen döküme ait parça görseli yer almaktadır.



Şekil 9. Prototip İmalat klape döküm model



Şekil 10. Prototip İmalat klape döküm

Klape dökümlerinde karşılaşılan sorunların önüne geçmek adına simülasyonda da olumlu sonuçların tespit edildiği sıcak dövme ile klape prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Sıcak dövme işlemi 500 ton kapasiteli Hico marka dövme ekipmanı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'te dövme prosesine ait görsel yer almaktadır.



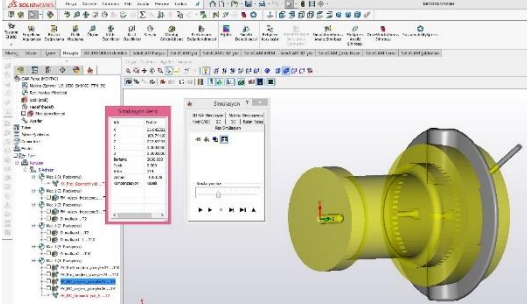
Şekil 11. Prototip sıcak dövme klape imalatı

Sıcak dövme işleminde kalıp sıcaklığı, proses süresi, dövme sıcaklığı ve dövme yüküne göre yapı değişkenlik göstermektedir. Şekil 14'te klape sıcak dövme numunesine ait resim gösterilmiştir.

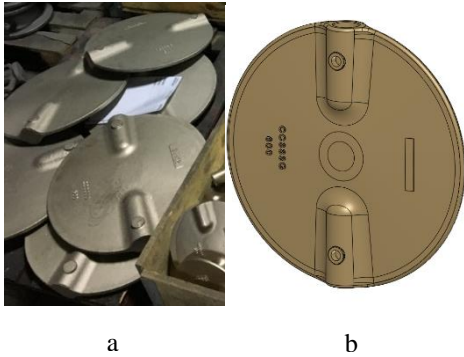


Şekil 12. Sıcak dövme ile üretilen prototip klape

Sıcak dövme ile üretilen prototiplerin bilgisayar destekli tezgahlar ile talaşlı imalatı yapılmak üzere aparat ve CAM programları oluşturularak CNC tezgahlarda işlenmiştir. Şekil 15'te klape nin CAM programı Şekil 16'ta ise klape nin talaşlı imalat öncesi ve sonrası görselleri yer almaktadır.



Şekil 13. Talaşlı imalat işlemi için klape CAM tasarımı



Şekil 14. Prototip imalat klape talaşlı imalat öncesi (a) ve sonrası (b) resimleri

Klape ve gövde üretimlerine ait prototip imalat gerçekleştirildikten sonra gövdelere ait kauçuk kaplama (EPDM) aşamasına geçilmiştir. Gövde kauçuk kaplama işlemi sıcak presler ile 50 ton basınç ve 260 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Şekil 17'de EPDM kaplama alt ve üst kalıpları, Şekil 18'de ise gövdesi EPDM kaplanmış Lug tip gövde parçası yer almaktadır.

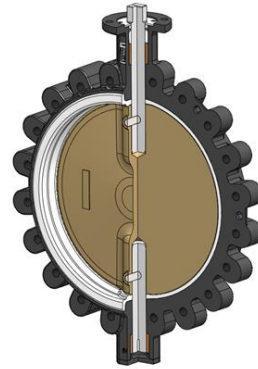


Şekil 15. Gövde kaplama kalıpları alt (sol) ve üst (sağ)



Şekil 16. EPDM kaplanmış Lug tip gövde

Döküm yöntemi ile üretilmiş, presle EPDM kaplanmış gövde ve sıcak dövme ile üretilmiş klape nin montaj tasarımları Şekil 19'da gösterilmiştir. Burada önemli olan nokta ölçüm hassasiyetlerine göre malzeme seçimi ve tasarımıdır.



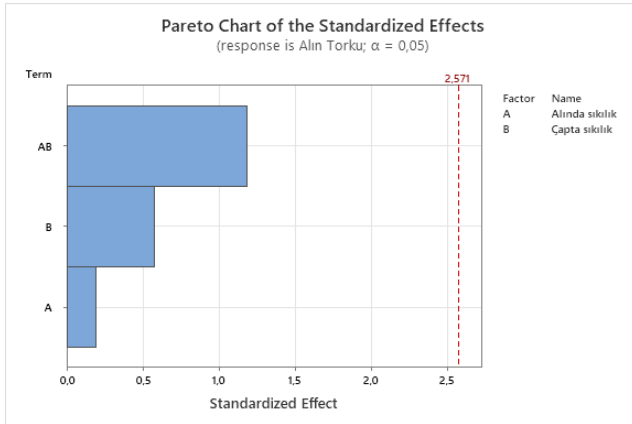
Şekil 17. EPDM Kaplanmış Lug Tip Gövde ve Sıcak Dövme ile Üretilmiş Klape Montaj Simülasyonu

Klape ve gövde montajında en hassas noktalardan bir tanesi de alın ve çap sıklıklarına göre klapeyi harekete geçirecek olan tork değerlerinin optimizasyonudur. Farklı gövde ve çap sıklıklarına göre elde edilen tork değerleri Minitab Veri analizi programı ile değerlendirilmiş ve optimum sıklık değerleri elde edilmiştir. Tablo 3'te Minitab deney tasarım modülü ile elde edilen faktörlerin sıralaması ile Şekil 20'de ise Minitab pareto analizi yer almaktadır.

Minitab verileri ve ölçüm değerlerinin doğrulanması ile elde edilmek istenilen ıslak tork değerleri Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin avantajı kullanıcıların elde talep ettiği ıslak tork değerlerine göre kauçuk kaplanmış gövde ve sıcak dövme ile üretilmiş klape nin ölçüm hassasiyetlerinin kolaylıkla tespit edilebilmesidir.

Tablo 3. Minitab alın torkuna etkileyen alındaki ve çaptaki sıklıkların alın torkuna etkisi

Numune	Alında sıklık (mm)	Çapta sıklık (mm)	Alın Torku (Nm)
1.	1,69	1,89	26
2.	1,70	1,87	5
3.	1,71	1,88	5
4.	1,72	1,91	5
5.	1,72	1,86	5
6.	1,73	1,89	25
7.	1,74	1,83	5
8.	1,76	1,82	16
9.	1,77	1,85	5



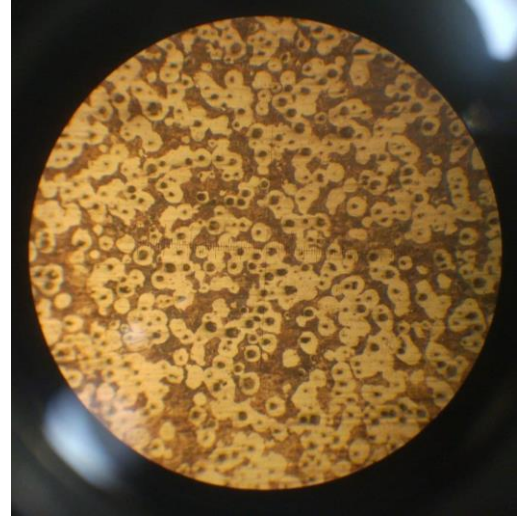
Şekil 18. Minitab pareto analizi

Tablo 4. Minitab verilerine göre işlenen gövde ve klapelere ait tork verileri.

Islak Tork (Nm)	Minitab Verisi (mm)		Ölçüm Verileri (mm)	
	Gövde Çap	Klape Çap	Gövde Çap	Klape Çap
81	150,59	152,45	150,56	152,42
87	150,58	152,45	150,60	152,43
94	150,57	152,45	150,56	152,43
98	150,59	152,43	150,60	152,42
106	150,57	152,42	150,54	152,43

BULGULAR

Lug ve Wafer tip kelebek vanaların her ikisinde de aynı gövde modelinden GGG 40.3 malzeme dökümü gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen dökümlerde herhangi bir sorun gözlenmemiş olup Şekil 21'de gösterilen mikro yapıların kontrolünde grafitlerin küresel yapıda ve homojen olarak dağılım gösterdiği, küreselleşmemiş grafitin bulunmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 19. Gövde döküm malzemesine ait mikro yapı resmi

Tablo 5'te ise bu mikro yapıya sahip modeller ile gerçekleştirilen mekanik test sonuçları yer almaktadır. Tespit edilen değerler standart gerekliliklerini karşılamaktadır.

Tablo 5'te gövde dökümüne ait mekanik değerler gösterilmiştir.

Tablo 5. Gövde malzemesine ait mekanik değerler

Malzeme	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma Sınırı (N/mm ²)	Uzama %	Sertlik HB
EN-GJS 400-18 LT	400	250	18	155
GGG 40.3				

Gövde klape ve millerinin birleşme noktalarında minimum 83,67 MPa, maksimum 752,99 MPa aralığında seçilen gerilemelerde mil malzemesi maksimum 654,73 MPa yüke maruz kalmakta ve bu değerlerde bile herhangi bir plastik deformasyon tespit edilmemiştir.

Klapelerin sıcak dövme prosesi için 300 tonluk basma yükü optimum değer olarak tespit edilmiştir. Parçanın mutlak ergime sıcaklığının 1/2 ile 1/3 arasındaki sıcaklık operasyon sıcaklığı olarak tespit edilmiş olup, bu sıcaklık değerinin altında kalan malzemelerde çatlama (Şekil 22), üzerindeki sıcaklıklarda ise homojensizlikler (Şekil 23) gözlenmiştir.

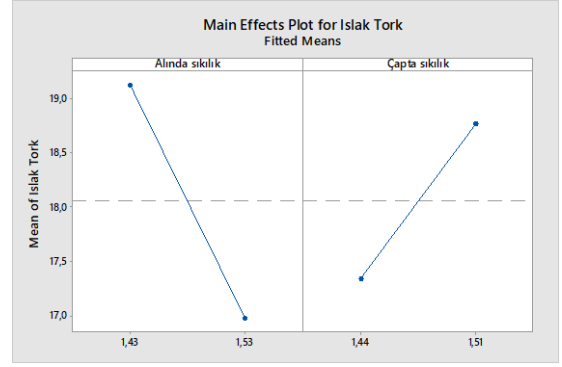


Şekil 20. Düşük kalıp sıcaklığında gerçekleştirilen sıcak dövmeyle ilgili parça görseli



Şekil 21. Yüksek proses sıcaklığında gerçekleştirilen sıcak dövmeyle ilgili parça görseli

Kauçuk kaplanmış gövde ve sıcak dövme ile üretilmiş klapelerin prototip imalatı sonrasında klapelerin gövde ile temasına göre değişkenlik gösteren ıslak tork değerlerine ait optimizasyon çalışması Minitab verileri ile deney tasarımı gerçekleştirilerek doğrulanmıştır. Sonuç olarak klape alın bölgesinde sıklık arttıkça ıslak tork azalırken, gövde çapında sıklık arttıkça ıslak torkun arttığı gözlenmiştir. Alındaki sıklık değerleri 1,43-1,53 mm arasında optimize edilirken gövde çapındaki sıklık değeri 1,44-1,51 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Ortalama 18 Nm ıslak tork değeri Minitab verileri ile kayıt altına alınmıştır. Şekil 24'te Minitab ıslak tork, alında sıklık ve çapta sıklık analizi yer almaktadır.



Şekil 22. Minitab ıslak tork, Alında Sıklık ve Çapta Sıklık Deney Tasarım Verileri

SONUÇ

Bu çalışmada döküm yöntemi ile üretilmiş gövde, sıcak dövme ile üretilmiş klape ve pres kalıp ile üretilen EPDM kaplamaların kombinasyonları detaylı olarak ele alınmıştır. Maliyet düşürme ve korozyon direncini arttırmak amacıyla tercih edilen bronz klapelerde elde edilen en önemli sonuç, tasarımların bilgisayar destekli ortamlarda gerçekleştirilmesi ve simülasyonlar ile doğrulama-geçerli kılma operasyonlarının prototip imalat sonuçları ile neredeyse bire bir yakın sonuçlar vermiş olmasıdır.

Çalışmanın özgün bir yanı da güncel bir konu olan enerji verimliliği, karbon ve su ayak izi için gerçekleştirilmiş olan gelişme ve iyileşmelerin detaylı olarak ele alınmış olmasıdır. İklim kriziyle mücadele kapsamında su kaynaklarının verimli kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. İklim krizinin oluşmasının başlıca sebepleri arasında yer alan ve küresel ısınmanın ölçüsü olan karbon ayak izinin azaltılması için çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışma neticesinde tasarımı gerçekleştirilmiş olan kelebek vana ürününde akış katsayılarındaki iyileştirmeler ile enerji kayıpları %32 azaltılmış, karbon ayak izi %26 düşürülmüştür. Gövde ve klape tasarımlarında simülasyon destekli testlerin, gerçek test verileri %100 oranında örtüşmesi simülasyon destekli tasarımların önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Makalede gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde özgün bombeli gövde ve kademeli mil yapısı için ulusal ve uluslararası patent başvuruları gerçekleştirilmiştir. Üretimin her aşamasında bilgisayar destekli tasarım ve simülasyon destekli uygulamalar mühendislik açısından oldukça kritiktir. Farklı şekil ve yapıya sahip prototip imalat elemanlarının montajı için kullanılması gereken optimum değerlerin deney tasarımı ve veri analiz programları ile değerlendirilmesi ile ampirik değerlere ulaşmak ve bu verileri doğru analiz etmek büyük bir öneme sahiptir.

SIMULATION ASSISTED EXPERIMENT DESIGN AND PROTOTYPE PRODUCTION OF BUTTERFLY VALVES

Butterfly valves, which are designed to enable the installations to open and close quickly in the valve industry and thus reduce water and energy loss, take their names from the placement of the disc and shaft. Although alternative methods such as rilsan or epoxy coating are used in order to increase the low corrosion resistance of commonly used ductile cast iron disc materials, it is impossible to reach the required corrosion resistance with these options, and it has been determined that the valve cannot fully fulfill its sealing functions. Stainless steel discs, which are used to increase corrosion resistance and improve sealing functions, are not preferred because of long lead times, high costs and machining difficulties. Bronze discs are of critical importance due to their low cost, short lead times and easy machining. Moreover, it is widely preferred in sector to increase the corrosion resistance and fulfill the sealing functions by coating the parts of the ductile cast iron body materials that meet the corrosive environment with rubber material. In this study, for the first time in the literature, ductile cast iron body original design of Lug-Wafer type butterfly valves, simulation-supported designs of the production of bronze discs by hot forging method and prototype production stages are discussed, the effects of the pressed EPDM coating dimensions on the wet torque were investigated with the experimental design to ensure the sealing on the body contact surfaces and the disc, and the optimum wet torque value of the system was determined.

Keywords: Butterfly Valve, Simulation Assisted Design, Bronze, Wet Torque

KAYNAKÇA

1. Ünlü C., Tesisat Mühendisliği Dergisi, 86 (2005), 83-86, İstanbul
2. Chern, M. J., Wang, C. C., and Ma, C. H., Performance Test and flow Visualization of Ball Valve, Exp Therm. and Fluid Sci. 31 (2007), 505-512.
3. Skousen, P.L., Valve Handbook: Flow Characteristics, p. 18-19, Newyork, 1998.
4. Oflaz, M., 2009, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Yaylı Emniyet Vanalarında Sızdırmazlığın Sağlanması İçin Kapatma Elemanı Kombinasyonunun Deneysel Olarak Belirlenmesi, 11-12.
5. Skousen, P.L., 1998. Valve Handbook: Manual Butterfly Valves, p. 111-121, Newyork, 1998.
6. Bozacı, A., Makina Elemanlar: Yaylar, Seç Yayın Dağıtım, cilt 1(2000), 8.1- 8.15.
7. Sandalcı, M., Effect of the Flow Conditions and Valve Size on Butterfly Valve Performance, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 30 (2010) 2, 103-112.
8. Filo, Grzegorz, Edward Lisowski, and Janusz Rajda. "Design and flow analysis of an adjustable check valve by means of CFD method." Energies 14.8 (2021): 2237.
9. Li, Yongjian, et al. "Microstructure characteristics and mechanical properties of new-type FeNiCr laser cladding alloy coating on nodular cast iron." Journal of Materials Processing Technology 269 (2019): 163-171.
10. Mena, A., et al. "CFD analysis of hydrogen injection pressure and valve profile law effects on backfire and pre-ignition phenomena in hydrogen-diesel dual fuel engine." International Journal of Hydrogen Energy 44.18 (2019): 9408-9422.
11. Ye, Yang, et al. "Suppressing the generation of cavitation by increasing the number of inlet check valves in piezoelectric pumps." Sensors and Actuators A: Physical 293 (2019): 56-61.
12. Zhang, Sha, et al. "Transient numerical investigation of a large-scale hydro-pneumatic suspension considering variations in check valve parameters and operational conditions." International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow 30.4 (2019): 1967-1990.
13. Kim, Nam-Seok, and Yong-Hoon Jeong. "An investigation of pressure build-up effects due to check valve's closing characteristics using dynamic mesh techniques of CFD." Annals of Nuclear Energy 152 (2021): 107996.
14. Li, Shuxun, et al. "Analysis and Optimization of the Opening Dynamic Characteristics of Molten Salt Check Valves for Concentrating Solar Power." Applied Sciences 13.5 (2023): 3146.
15. Chamas, Ali, et al. "High temperature/pressure MAS-NMR for the study of dynamic processes in mixed phase systems." Magnetic Resonance Imaging 56 (2019): 37-44.
16. Bhowmik, Palash K., and Kune Y. Suh. "Flow mapping using 3D full-scale CFD simulation and hydrodynamic experiments of an ultra-supercritical turbine's combined valve for nuclear power plant." International Journal of Energy and Environmental Engineering 12.3 (2021): 365-381.
17. Gök, O., 2014, Kelebek vanaların optimizasyonu ve yeni bir kelebek vana tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 39-44.

YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;
Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.
- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıttığı yazılar yayımlanabilir

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı'na aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfıdır. "Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulları ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı tarafından seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of
**MECHANICAL
DESIGN
AND
PRODUCTION**

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the METU Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Education and Research Foundation, Ankara, Turkey.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
 - Uygulama Makaleleri.
 - Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
 - Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
 - Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
 - Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanımlandığı yazılardır.
- Örnek makale <https://parlar.org.tr/matim> sitesinde verilmiştir. Yazarlar, makalelerini TÜBİTAK ULAKBİM tarafından yürütülen <http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim> sitesine yüklemelidirler. Bir sorun ile karşılaşılırsa İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Hakan Kalkan (hakan.kalkan@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirler. Yazarlar, yayınlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik olarak aynı şekilde yüklemelidirler. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır.

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanılmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

Makalenin Yapısı

- Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.
- Makalenin adı
 - Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
 - Özet ve anahtar kelimeler
 - Makalenin ana kısmı
 - Teşekkür (gerekli ise)
 - İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
 - Kaynakça
 - Ek(ler) varsa
- Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir. Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir. Özetinde sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanımlanmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,

- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırda devam edilmelidir.

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, bilgisayar ile anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazılı belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle bilgisayar kullanımında "l" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşliğin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için bilgisayar ile düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında çizilmelidir. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler yeterli çözünürlükte sağlanmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Derginin elektronik ortamda renkli olarak yayınlanacağı dikkate alınmalıdır.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

- Dergi Makalesi
1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376. Kitap
 2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983. Rapor
 3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980. Kongre Makalesi
 4. Adalı, E. ve Tunali, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler bilgisayar ile A4 formatında, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.