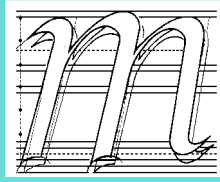


MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 23

Sayı: 2

Kasım 2025



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: Bahram Lotfi

ODTÜ
Atılım Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
TOBB ETÜ

Kurul Üyeleri

Mustafa Bakkal
Erhan Budak
Hakan Çalışkan
Volkan Esat
Mehmet Fırat
Necdet Geren
Yiğit Karpat
Yusuf Kaynak
İsmail Lazoğlu
Haydar Livatyalı
Ramazan Hakkı Namlu
Ali Oral
İ. Ethem Saklakoğlu
Ulvi Şeker
Hakkı Özgür Ünver
Ali Rıza Yıldız

İTÜ
Sabancı Üniversitesi
ODTÜ
University of Hertfordshire
Sakarya Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
Bilkent Üniversitesi
Marmara Üniversitesi
Koç Üniversitesi
YTÜ
Atılım Üniversitesi
Balıkesir Üniversitesi
Ege Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
TOBB ETÜ
Uludağ Üniversitesi

Danışma Kurulu

Bilgin Kaftanoğlu
S. Engin Kılıç
Haluk Darendeliler
Özgür Başer
Gökhan Bayar

Atılım Üniversitesi
ODTÜ
ODTÜ
Süleyman Demirel Üniversitesi
Bülent Ecevit Üniversitesi

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: 23 Sayı: 2

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 23 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

Investigation of Mechanical and Internal Structure Properties of 1040 Steel After Heat Treatments 47

Hıdır Sercan Çubuk
İnal Kızılca
Alper Mutlu
Uğur Çavdar

Experimental and Numerical Investigation of Aerogel Based Insulation Material for Aerospace Applications 56

Furkan Karaboğa
Abdullah Tav
Merve Özkutlu Demirel
Serkan Toros
Yahya Öz
Halil I. Akyıldız

Tasarımda Altı Sigma Yöntemi ile Statik İvme Test Düzenegi Tasarımı 65

Namık Kılıç
Sarper Özcan
Berkman Kantar

GGG40 Dökme Demirin Kriyojenik ve Kriyojenik İşlem Görmemiş Kesici Uçlarla Frezelenmesinde Kesme Sıcaklık Değerlerinin Taguchi ve Yapay Sinir Ağı Algoritmaları ile Tahmini ve Kesme Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi 88

Gürcan Samtaş

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 ulaşılabilir.

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

Hıdır Sercan Çubuk* Dokuz Eylül University, Graduate School of
Natural and Applied Sciences
Construction and Manufacturing Program
İzmir, Türkiye**İnal Kızılca** İzmir Demokrasi University, Graduate School of
Natural and Applied Sciences,
Mechanical Engineering Program
İzmir, Türkiye**Alper Mutlu** Dokuz Eylül University, İzmir Multidisciplinary
Vocational School Electronical Automation
Biomedical Equipment Technology
İzmir, Türkiye**Uğur Çavdar** İzmir Demokrasi University,
Faculty of Engineering
Mechanical Engineering Department
İzmir, Türkiye**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 12 Aralık 2024

Kabul: 19 Eylül 2025

*Sorumlu yazar: Hıdır Sercan Çubuk

E-mail: hsercancubuk@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.159940>

Investigation of Mechanical and Internal Structure Properties of 1040 Steel After Heat Treatments

This study aims to compare two heat treatment techniques—high-frequency induction and conventional furnace heating—applied to AISI 1040 medium-carbon steel. The effects on surface hardness, microstructure, and energy efficiency were evaluated under controlled thermal conditions at 950 °C followed by water quenching. A total of six samples were examined, varying in heating durations from 2 to 10 minutes for induction and 60 minutes for furnace treatment. A 4-minute induction process was found to be the most efficient, providing the highest surface hardness (647 HV), optimal martensitic depth (172.75 µm), and 33% lower energy consumption compared to the furnace-treated sample (613 HV). Microstructural analysis revealed a dense martensitic layer near the surface for induction-treated samples, while furnace-treated specimens exhibited a uniform ferrite–pearlite structure. This makes short-duration induction hardening a cost-effective and technically superior surface treatment strategy for medium-carbon steels.

Keywords: Steel 1040; induction; heat treatment; penetration; hardness

1. INTRODUCTION

Steel, an alloy primarily composed of iron with varying carbon and alloying element content, exhibits mechanical properties that are strongly influenced by its composition and internal structure. Its abundance, affordability, and compatibility with various manufacturing techniques—such as rolling, casting, and welding—make it a widely used material across multiple industries [1,2]. Through thermal treatments, key mechanical characteristics such as hardness, strength, and ductility can be adjusted by modifying grain size and phase composition, thereby enhancing steel's functional range [2]. As a result, heat treatment stands out as a vital method for adapting steel properties to industrial requirements [1–3].

AISI 1040, a medium-carbon steel containing approximately 0.4 wt.% carbon, undergoes hardness

enhancement through cementite phase formation during thermal processing [4,5]. This steel possesses a body-centered cubic (BCC) structure at room temperature, which transforms into austenite at approximately 910 °C due to reduced atomic spacing within the lattice [4,6–9]. The thermal response during heating is determined by factors such as chemical composition, part geometry, and application-specific performance needs. In particular, the heating rate is inversely proportional to thermal conductivity and directly influenced by component dimensions [8–14].

High-frequency induction hardening has emerged as an effective heat treatment technique for improving both fatigue performance and wear resistance in engineering applications. The success of this method is dependent on material properties such as electrical resistivity (ρ), magnetic permeability (μ), and operating frequency (f). Induction-treated AISI

1040 steels often show greater surface hardness and toughness than those subjected to conventional furnace treatments, offering advantages in performance-critical scenarios [15–17].

Furnace heat treatments can also enhance the mechanical behavior of medium-carbon steels like AISI 1040. Pangestu and Rosidah (2024) [18] demonstrated that austenitizing at 950 °C for 60 minutes followed by water quenching increased surface hardness to around 590 HV, confirming the effectiveness of furnace-based approaches. However, the achieved hardness tends to be lower and more uniformly distributed compared to induction methods. Onan et al. (2012) [19] found that longer induction durations elevated surface hardness while maintaining core ductility, with microstructural analysis revealing a martensitic outer layer and a ferrite–pearlite core, validating induction's ability to improve mechanic properties. Likewise, Alrashdan et al. (2021) [20] reported that optimized austenitizing followed by rapid quenching significantly enhanced surface hardness, tensile strength, and ductility. These findings support the view that while furnace treatments contribute to surface hardening, their performance remains limited compared to induction methods applied under similar thermal conditions.

Although numerous studies have individually addressed induction and furnace heat treatments for carbon steels such as AISI 1040 [15–22], a systematic comparison of both methods under thermally equivalent parameters remains scarce. Particularly, few studies provide an integrated assessment of mechanical behavior, structural development, and energy performance. The present study addresses this gap by offering a side-by-side evaluation of high-frequency induction and furnace treatments applied to AISI 1040 steel under matched thermal conditions [18–22].

In contrast to earlier studies that often focused on isolated parameters like surface hardness or microstructure, this research adopts a multidimensional approach, analyzing hardness distribution, penetration depth, and specific energy consumption per unit mass within the same framework [15–22]. This allows for a more comprehensive understanding of the balance between energy efficiency and material performance—especially crucial in industrial environments where both reliability and cost are paramount [15,17,19,20]. Induction hardening, in this respect, offers precise surface property optimization without altering chemical composition [15–17]. Through controlled application of process parameters such as heating time and power level, targeted hardness values and depth gradients can be achieved. Consequently, an optimized hardened layer can be generated,

enhancing overall surface performance [15,16, 19–22].

Accordingly, the main objective of this study is to evaluate the hardening behavior of AISI 1040 steel—a cost-effective and industrially significant medium-carbon alloy—following water quenching after high-frequency induction and conventional furnace heat treatments. The investigation emphasizes a comparative analysis of these processes in terms of their effects on mechanical properties, microstructural evolution, and energy efficiency. By implementing both treatments under thermally equivalent conditions, this study provides a novel and holistic evaluation that addresses the fragmented nature of previous findings.

2. EXPERIMENTAL WORK

In this study, six cylindrical specimens of AISI 1040 medium-carbon steel were used to comparatively investigate the effects of high-frequency induction and conventional furnace heat treatments. Each sample was machined to identical dimensions—18.31 mm in diameter ($\pm 0.3\%$) and 4.96 mm in thickness ($\pm 0.2\%$)—to ensure dimensional consistency across the experimental group. The approximate mass of each specimen was calculated as 10.2 g based on a material density of 7.85 g/cm³. The initial Vickers hardness of the untreated base material was 232.25 HV, which served as a reference for post-treatment comparisons.

Table 1 lists the elemental composition of the AISI 1040 steel, highlighting elements such as C, Mn, Si, and Cu, which are critical in determining the steel's thermal and mechanical behavior during heat treatment. Table 2 summarizes the applied processing parameters, including the constant austenitization temperature (950 °C), heating durations, and cooling methods for both induction and furnace treatments.

Figure 1a shows the laboratory-scale high-frequency induction system (2.8 kW, 900 kHz, 99% power, coil diameter 24 mm) used for durations of 2, 3, 4, 5, and 10 minutes. Figure 1b illustrates the conventional furnace employed for the furnace-based procedure, in which the specimen was heated to 950 °C and held isothermally for 60 minutes. The average heating rate of the furnace was approximately 15.42 °C/min, taking around 60 minutes to reach the target temperature. This slow, uniform heating was intended to minimize thermal gradients and achieve a homogeneous temperature distribution throughout the specimen. Figure 1c shows the appearance of the induction system during heat treatment.

Table 1. Elemental composition of 1040 sample

Element in Material	C	Mn	Si	S	P	Cu
Percentage in Element (%)	0.38	0.72	0.18	0.025	0.021	0.041

Table 2. Process parameters

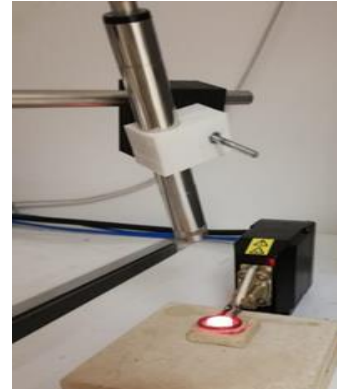
No.	Prosses	Heating (°C)	Dwell Time	Cooling
1	Induction	950°C	2 min.	Quenching
2	Induction	950°C	3 min	Quenching
3	Induction	950°C	4 min	Quenching
4	Induction	950°C	5 min	Quenching
5	Induction	950°C	10 min	Quenching
6	Furnace	950°C	60 min	Quenching



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. (a) Induction device, (b) furnace, (c) view of the induction system during heat treatment

Following heat treatment, all samples were subjected to rapid water quenching under atmospheric and still-air conditions at approximately 25 °C. Rapid cooling was employed to induce martensitic transformation, particularly near the surface, and to preserve a soft ferrite–pearlite structure at the core. For the induction process, direct thermocouple-based temperature measurements were not performed due to equipment limitations; instead, exposure time under constant power served as the heating control parameter.

Microstructural analysis was conducted on polished and etched cross-sectional specimens using a Nikon H600L optical microscope. Sample preparation involved sequential grinding with silicon carbide papers (100–2500 grit), followed by polishing with diamond suspensions (6 µm and 1 µm). Etching was performed with 3% Nital for 5 seconds to reveal microstructural features.

Hardness measurements were carried out using a Metkon Duroline LV Vickers hardness tester with a 10 kgf load and 10-second dwell time. Measurements were taken radially at intervals of 1–3 mm from the surface inward (3 tracks with 1 mm spacing and 2 tracks to the center with 3 mm

spacing). As shown in Figure 2, five indents were made from the surface to the core to determine penetration depth, which was defined as the distance from the surface to the region where the hardness value dropped below ~550 HV, approaching core hardness.

Energy consumption during heat treatment was measured using a Fluke 434-II power quality and energy analyzer, calibrated in an accredited laboratory. Readings were standardized using root mean square (RMS) values to enable consistent comparisons. Energy consumption per unit mass ($\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$) was calculated and multiplied by specimen mass to obtain energy use per sample (kWh). Subsequently, cost was determined using a standard electricity tariff of 1 TL/kWh (for the year 2025), based on national rates in Türkiye.

3. RESULTS

3.1. Hardness Results

The application of high-frequency induction heat treatment significantly enhanced the surface hardness of AISI 1040 steel specimens. While the untreated base material exhibited an initial hardness of 232.25 HV, the sample subjected to a 4-minute

induction cycle reached a peak hardness of 647.51 HV, corresponding to an approximate increase of 179%. Fig. 2. Hardness points by measured

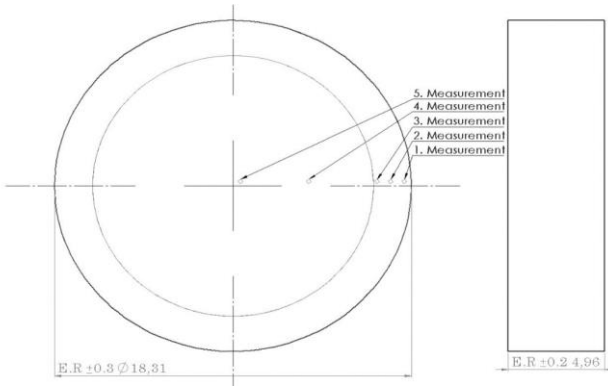


Fig. 2. Hardness points by measured

All induction-treated specimens displayed a gradual reduction in hardness from the surface toward the core, characteristic of localized martensitic transformation. As shown in Fig. 3a, 2 min treatment resulted in an average surface hardness of 593.73 HV, which increased to an average of 619.59 HV at 3 min (Fig. 3b). The highest hardness was recorded in the 4 min sample (Fig. 3c), confirming the optimum time for martensite formation under the applied parameters. However, extended durations led to a decrease in hardness, with average values of 639.82 HV at 5 minutes (Figure 3d) and 605.52 HV at 10 minutes (Figure 3e), likely due to over-tempering or grain coarsening associated with prolonged thermal exposure.

The conventionally furnace-treated specimen, which was held at 950 °C for 60 minutes and then water-quenched, exhibited a more uniform but lower average surface hardness of 613.08 HV (Figure 3f). Although this value falls below the maximum obtained through induction, it still reflects a substantial ~164% increase over the base material. The uniformity of this profile can be attributed to the steady heating rate and extended soaking period. The overall trend, summarized in Figure 3g, illustrates that surface hardness increases with induction duration up to 4 minutes, beyond which thermal degradation becomes evident. These findings suggest that the 4-minute induction cycle represents the optimal condition for achieving both high surface hardness and structural integrity.

The results of this study are in strong agreement with previous literature. For example, Sanusi and Akunlabi (2018) [1] reported increased

hardness and reduced ductility in AISI 1040 steel following water quenching after 950 °C annealing—a trend that parallels the hardness gradient observed here. Additionally, Onan et al. (2012) [19] documented hardness values ranging from 630 to 690 HV in induction-hardened AISI 1040 steels, depending on duration and frequency. The 647.51 HV recorded in the present 4-minute sample fits well within this range, further validating the effectiveness of the selected parameters.

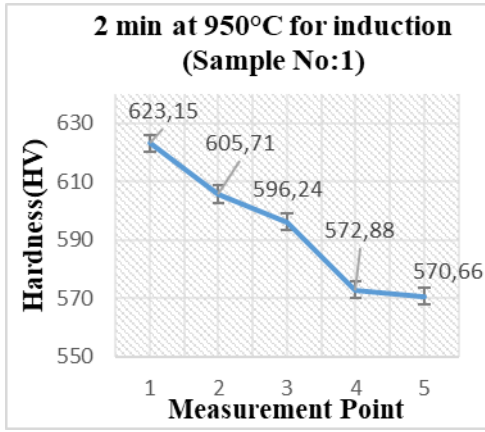
These findings, supported by quantitative data and related studies, reveal that short-term induction heating provides the same hardness in medium carbon steels such as AISI 1040 in a shorter time. Figure 3 shows the hardness data obtained in the study in detail.

3.2. Microstructure Results

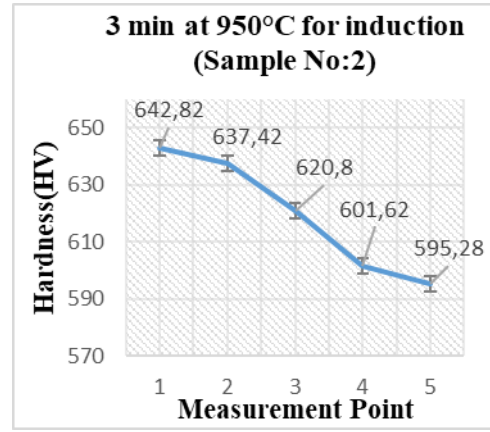
The influence of induction heating duration on the microstructure of AISI 1040 steel was investigated using optical microscopy and quantified by measuring the martensitic layer penetration depth. No elemental (EDX), carbon diffusion, or tribocorrosion analyses were performed in this study; thus, interpretations are limited to morphological observations and hardness-based depth measurements.

Optical images revealed a clear martensitic transformation near the surface for samples subjected to induction treatment, with increasing depth and structural changes as the duration extended. Short durations (2–4 minutes) resulted in a compact, well-defined martensitic layer adjacent to a ferrite–pearlite core, which supports high surface hardness while maintaining ductile properties internally.

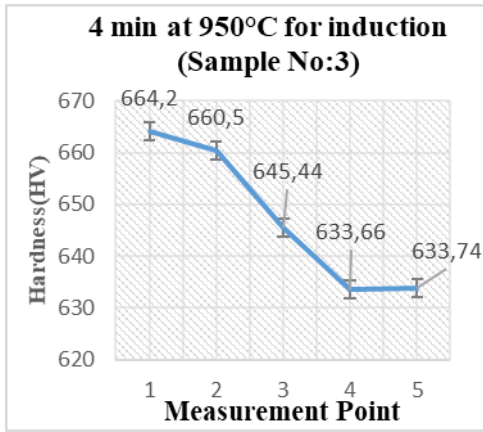
The penetration depth of the martensitic layer varied significantly with induction duration. Specifically, depths of 123.87 µm, 151.70 µm, 172.75 µm, 196.49 µm, and 238.41 µm were measured for the 2-, 3-, 4-, 5-, and 10-minute treatments, respectively. The 4-minute condition exhibited a 39.5% increase over the 2-minute sample and a 13.9% increase compared to the 3-minute sample, while being 13.7% shallower than the 5-minute sample. The 10-minute duration showed a 38.0% higher depth than the 4-minute condition. Due to the absence of a distinct martensitic structure, the furnace-treated specimen was not included in the penetration depth evaluation.



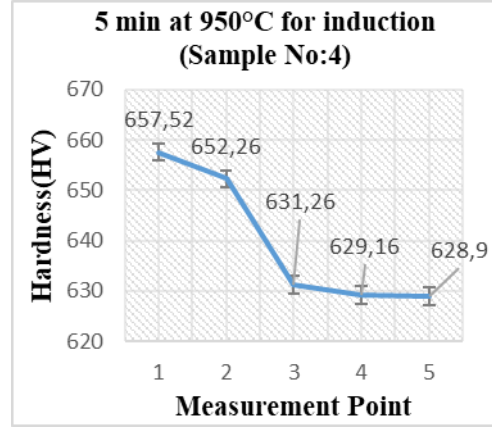
(a)



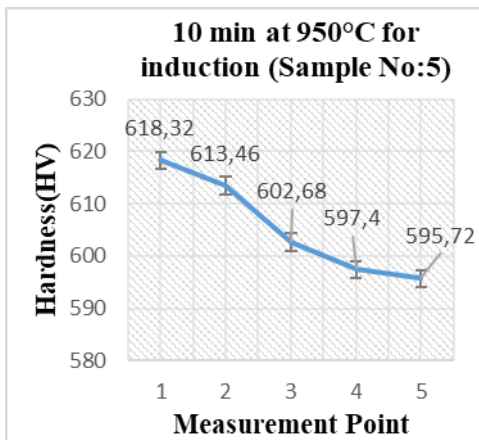
(b)



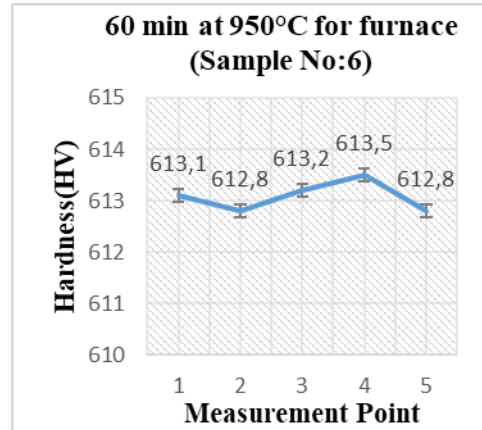
(c)



(d)



(e)



(f)

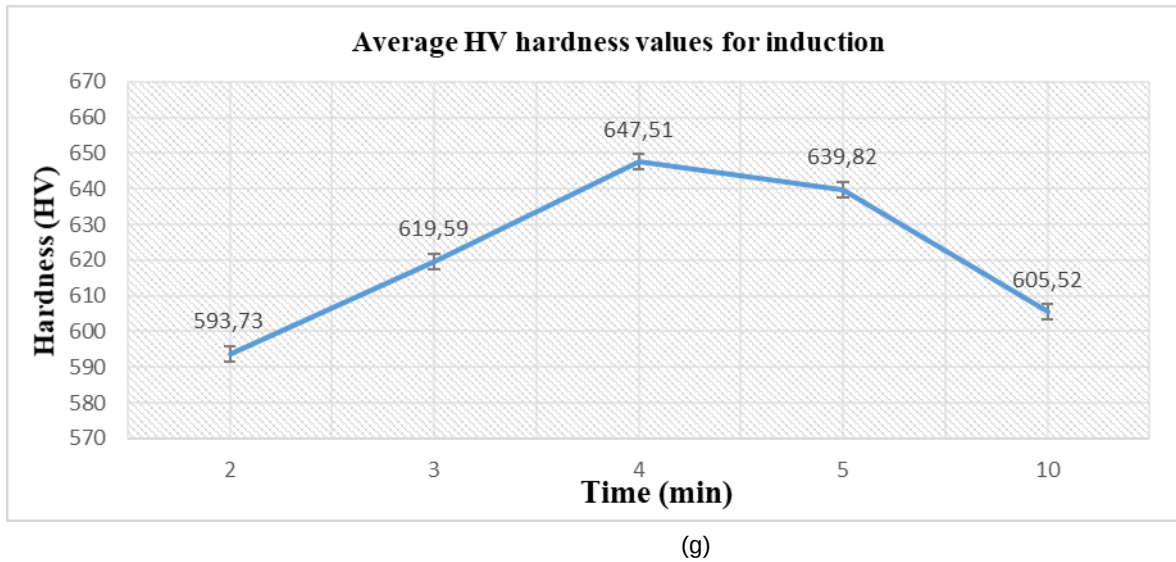


Fig 3. HV hardness results after induction of (a) 2 minutes (Sample No: 1); (b) 3 minutes (Sample No: 2); (c) 4 minutes (Sample No:3); (d) 5 minutes (Sample No: 4); (e) 10 minutes (Sample No: 5); (f) 60 minutes for furnace (Sample No:6); and (g) average HV hardness values after induction applied to 1040 steel material

The sample treated in the conventional furnace was excluded from penetration depth evaluation due to the absence of a distinct martensitic layer. Its microstructure exhibited a fully ferrite-pearlite composition across the cross-section, consistent with slow heating and long soaking conditions. While more uniform, this configuration lacks the targeted hardening characteristics achieved through induction. The findings obtained here are also consistent with previous literature studies[1,15-22].

These findings validate the efficiency of short-duration, high-frequency induction hardening as a surface treatment strategy for medium-carbon steels when controlled transformation depth and gradient are desired. "The previously presented optical images (Figure 4a-d) and the quantitative penetration depth values in Table 3 jointly support this interpretation.

3.3. Cost Analysis Results

To assess the energy efficiency of the applied heat treatment methods, a detailed cost analysis was conducted. The primary objective was to quantify energy consumption at different process durations and identify the most economically viable parameter in terms of surface performance and industrial scalability.

Energy consumption was measured using a Fluke 434-II power quality and energy analyzer, which records electrical data in real-time based on root mean square (RMS) values. During each heat treatment cycle, total power consumption was logged and normalized by the sample mass (10.2 g) to yield energy consumption values in units of $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$.

These values were then converted into cost per sample (TL (Turkish Lira) /sample) using an average national electricity tariff of 1 TL per kWh applicable in Türkiye (2025) at the time of the study. All experimental runs were repeated three times to ensure accuracy and reproducibility.

As summarized in Table 4, a clear correlation was observed between induction duration and energy demand. The 2-minute induction cycle consumed $1.52 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, while the 10-minute treatment reached $5.11 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, indicating a 236% increase. Conversely, the conventional furnace process, which included 60 minutes of heating and 60 minutes of soaking, consumed $3.62 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ despite its longer overall cycle.

From a performance-cost perspective, the 4-minute induction process was identified as optimal. It achieved the highest surface hardness (647.51 HV) with a moderate energy input of $2.42 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, translating to a unit cost of only 0.048 TL per sample. In comparison, the furnace-based process incurred a higher cost of 0.072 TL per sample, while the 10-minute induction cycle reached 0.102 TL due to excess energy consumption.

This optimized result stems from a precise balance between heating time and energy transfer, promoting effective martensitic transformation without inducing grain coarsening or over-tempering. While direct abrasion or corrosion testing was beyond the scope of this study, the observed martensitic morphology is commonly associated with improved wear resistance, making the optimized condition promising for industrial applications

subjected to surface loading [15-22]. In addition, the findings are consistent with prior studies. The U.S. Department of Energy (1998) reported that induction heating systems could achieve up to 84% energy efficiency, significantly outperforming electric radiant (71%) and gas-fired heaters (40%). Similar industrial-scale findings by Ultraflex Power Technologies highlighted that the cost per part using induction preheating could be less than \$1, whereas

conventional methods may exceed \$6 per part depending on the energy source.

In conclusion, the 4-minute induction heat treatment not only produced the highest hardness performance, but also minimized energy consumption and associated cost. These advantages make it a suitable and scalable method for energy-sensitive, high-efficiency manufacturing applications involving medium-carbon steel. Table 4 shows the energy data

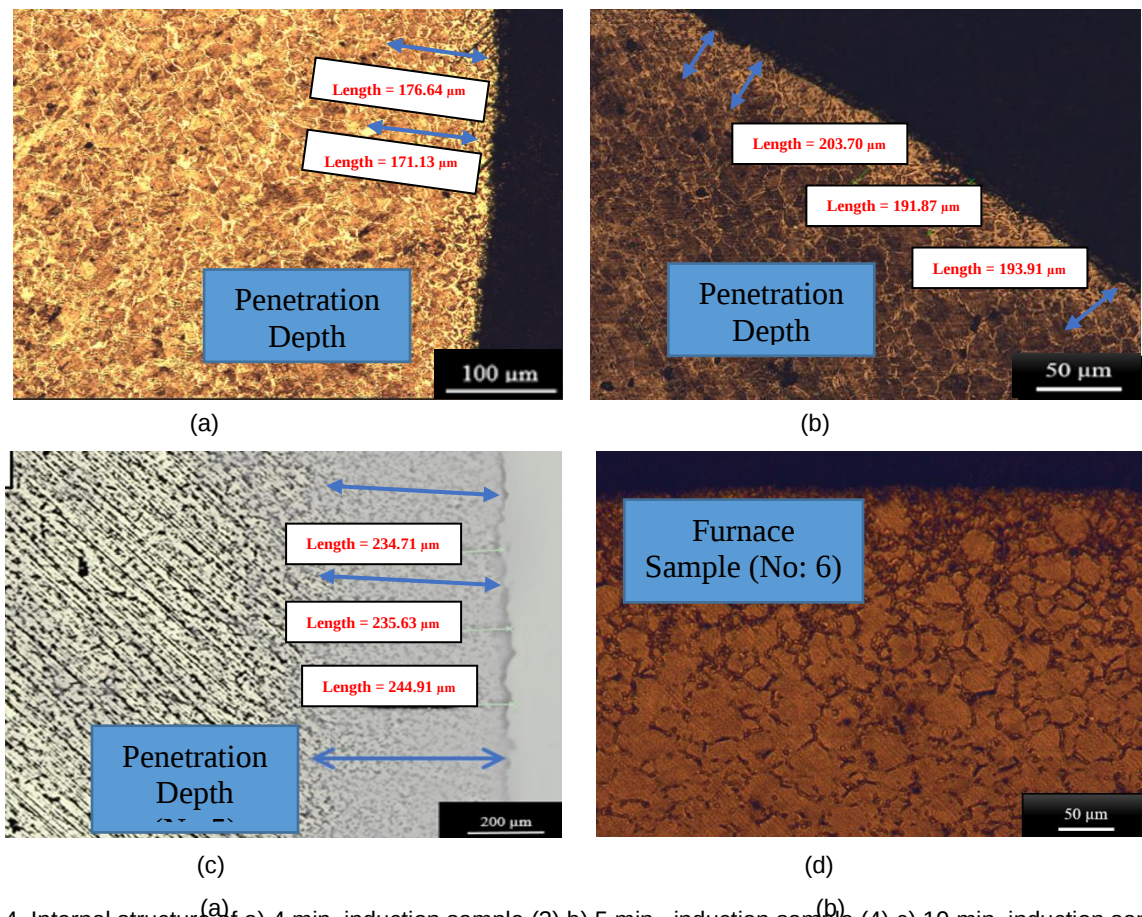


Fig. 4. Internal structure of a) 4 min. induction sample (3) b) 5 min. induction sample (4) c) 10 min. induction sample (5) d) oven sample (6)

Table 3. Penetration depth in induced samples

Duration-Penetration Depth	2 min Induction	3 min Induction	4 min Induction	5 min Induction	10 min Induction
<i>I. measurement</i>	125.85 μm	150.52 μm	176.64 μm	203.70 μm	234.71 μm
<i>II. measurement</i>	124.09 μm	152.84 μm	171.13 μm	191.87 μm	235.63 μm
<i>III. measurement</i>	121.68 μm	151.76 μm	170.48 μm	193.91 μm	244.91 μm
<i>Average</i>	<i>123.87 μm</i>	<i>151.70 μm</i>	<i>172.75 μm</i>	<i>196.49 μm</i>	<i>238.41 μm</i>

Table 4. Measured energy values

Features and Heat Treatment Type	Induction					Oven
Heating time	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	(60 min stabilized + 60 min hold)
Energy consumption values of the Fluke 434-II (kWh.kg ⁻¹)	1.52	1.82	2.42	2.74	5.11	3.62
Energy per Sample (kWh)	0.0155	0.0185	0.0246	0.0279	0.0521	0.0369
Cost per Sample (TL-₺)	0.0155	0.0185	0.0246	0.0279	0.0521	0.0369

4. CONCLUSION and DISCUSSION

This study comparatively examined the influence of high-frequency induction and conventional furnace heat treatments on the surface hardness, microstructural evolution, and energy efficiency of AISI 1040 medium-carbon steel. All samples were subjected to heat treatment at 950 °C followed by water quenching. Among the examined conditions, the 4-minute induction treatment yielded the highest surface hardness of 647.51 HV, marking a 179% improvement over the untreated base material (232 HV). Although extending the induction time to 10 minutes increased the hardening depth to 238.41 µm, this came at the cost of reduced surface hardness (605.52 HV), indicating the onset of grain coarsening due to excessive thermal exposure.

From an energy standpoint, the 4-minute induction process proved highly efficient, consuming 2.42 kWh·kg⁻¹, approximately 33% less than the furnace route (3.62 kWh·kg⁻¹). On a per-sample basis, this translated to a cost of 0.048 TL, compared to 0.072 TL for the furnace and 0.102 TL for the extended 10-minute induction cycle. These results demonstrate that the 4-minute induction treatment offers the most favorable compromise between surface hardness, hardening depth (172.75 µm), and energy cost. The enhanced performance is attributed to optimal energy input that facilitates complete martensitic transformation while minimizing structural degradation and excessive energy expenditure. In this context, optimization refers to achieving a process window where thermal exposure, energy use, and mechanical performance are effectively balanced.

ACKNOWLEDGMENT

This study was produced while conducting research within the scope of TÜBİTAK BİDEB

2210-C Priority Areas Master's Scholarship Program. (Capt. No: 1649B022215401). We would like to thank TÜBİTAK for increasing the scope of our research

1040 ÇELİĞİNE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER SONRASI MEKANİK VE İÇ YAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışma, AISI 1040 orta karbonlu çeliğe uygulanan iki farklı ısıl işlem tekniğinin—yüksek frekanslı indüksiyon ve geleneksel fırın ile ısıtma yöntemlerinin—yüzey sertliği, mikro yapı ve enerji verimliliği üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Her iki yöntem de 950 °C sıcaklıkta uygulanan ve su verme ile tamamlanan kontrollü termal koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Toplam altı numune farklı sürelerde ısıtılmıştır: indüksiyon için 2 ila 10 dakika, fırın için ise 60 dakika. 4 dakikalık indüksiyon işlemi, en yüksek yüzey sertliğini (647 HV), optimum martensit derinliğini (172.75 µm) ve fırın işlemine göre %33 daha düşük enerji tüketimini sağlayarak en verimli seçenek olarak öne çıkmıştır. Fırın işlemine tabi tutulan örnek ise daha düşük yüzey sertliği (613 HV) sunmuş ancak daha homojen bir ferrit-perlit yapı sergilemiştir. Mikro yapı analizi, indüksiyonla işlem görmüş örneklerin yüzeye yakın bölgelerinde yoğun martensitik bir katman oluştuğunu ortaya koyarken, fırınla işlem görmüş numunelerin daha homojen ferrit-perlit yapıda olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, kısa süreli indüksiyonla sertleştirmenin orta karbonlu çelikler için maliyet etkin ve teknik açıdan üstün bir yüzey işlem yöntemi olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: 1040 Çelik; indüksiyon; ısıl işlem; penetrasyon; sertlik

REFERENCES

- Sanusi, K. O., Akinlabi, E. T. Experiment on effect of heat treatment on mechanical and microstructure properties of AISI steel, *Materials Today: Proceedings*, 2018. 5(9), 17996-18001.
- Murmu, S., Chaudhary, S. K., Rajak, A. K., Effect of heat treatment on mechanical properties of medium carbon steel welds, *Materials Today: Proceedings*, 2022. 56, 964-970.
- Asif, M., Ahad, M. A., Iqbal, M. F. H., Reyaz, S., Experimental investigation of thermal properties of tool steel and mild steel with heat treatment, *Materials Today: Proceedings*, 2021. 45, 5511-5517.
- Prasad, C. T., Umesh, G., Surya, N., Investigation of hardness for AISI 1040 steel using various cooling methods. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 7(3), 207-211. Telengana, India, 2018.
- Srivastava, A., et al., Structural and fem analysis of heat treatment effects on mild steel, *Materials Today: Proceedings*, 2021. 46, 11064-11071.
- Sokollu, B., Gulcan, O., Konukseven, E. I. Mechanical properties comparison of strut-based and triply periodic minimal surface lattice structures produced by electron beam melting, *Additive Manufacturing*, 2022. 60, 103199.
- Singh, S., et al., Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel, *Materials Today: Proceedings*, 2021. 45, 5097-5101.
- Gurumurthy, B. M., et al., Microstructure authentication on mechanical property of medium carbon Low alloy duplex steels, *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. 9(3), 5105-5111.
- da Costa Aichholz, S. A., et al. Tribocorrosion behavior of boronized AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 2018. 352, 265-272.
- Kumar, S., Maity, S. R., Patnaik, L. Effect of heat treatment and TiN coating on AISI O1 cold work tool steel, *Materials Today: Proceedings*, 2020. 26, 685-688.
- Aramaki, M., et al., Effects of nitriding-quenching and carburizing-quenching on wear properties of industrial pure iron. *Journal of Heat Treatment and Materials*, 2018. 73(3), 131-143.
- Özerkan, H. B. Experimental fatigue life determination of thermo-diffusion surface boronized of AISI 1040 steel, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019. 33(10), 4957-4962.
- Samiuddin, M., et.al., A study of induction hardening parameters for the din 42crmo4 alloy through its micro hardness, corrosion resistance, and microstructure examination, *Physics of Metals and Metallography*, 2021. 122(11), 1121-1131.
- Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, O., Volumetric heat source model for laser-based powder bed fusion process in additive manufacturing, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021. 25, 101021.
- Kohli, A., Singh, H. Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology. *Sadhana*, 2011. 36(2), 141-152.
- Fisk, M., et al., Modelling of induction hardening in low alloy steels, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2018. 144, 61-75.
- Guillermo R., Tech Tip: Effective or rms voltage of a sinusoid, *The Technology Interface*, Spring 2006, Vol. 6 No. 1 ISSN 1523-9926 <http://engr.nmsu.edu/~etti/Springer>
- Pangestu, M. A., & Rosidah, A. A. (2024). Austenitizing Temperature and Quenching Media Effects on Hardness and Microstructure in Hardening of AISI 1040 Steel. *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, 3(2), 54-59.
- Onan, M., Baynal, K., Ünal, H. İ., & Katre, F. (2012, November). Optimization of induction hardened AISI 1040 steel by experimental design method and material characterization analysis. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 45196, pp. 1219-1224). American Society of Mechanical Engineers.
- Alrashdan, K. R., Ali, F. A., & Khedr, M. M. A. (2018). Enhancing the mechanical properties of carbon steel (AISI 1040) by optimized heat treatment process. *Materials Science: Indian Journal*, 16(2), 131.
- Chandran, R., Udhayaraj, S., & Eazhil, K. M. (2022). Effect of the heat-treatment process on the mechanical and microstructure properties of EN8 steel. *International Journal of Surface Engineering and Interdisciplinary Materials Science (IJSEIMS)*, 10(1), 1-12.
- Gurumurthy, B. M., Gowrishankar, M. C., Sharma, S., Kini, A., Shettar, M., & Hiremath, P. (2020). Microstructure authentication on mechanical property of medium carbon Low alloy duplex steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5105-5111.

Furkan Karaboğa* 

Turkish Aerospace, 06830, Ankara, Türkiye

Abdullah Tav 

Bursa Uludağ University, 16000, Bursa, Türkiye

Merve Özkutlu Demirel 

Turkish Aerospace, 06830, Ankara, Türkiye

Serkan Toros 

Turkish Aerospace, 06980, Ankara, Türkiye;
Niğde Ömer Halisdemir University,
51240, Niğde, Türkiye

Yahya Öz 

Turkish Aerospace, 06980, Ankara, Türkiye

Halil I. Akyıldız 

Bursa Uludağ University, 16000, Bursa, Türkiye

Experimental and Numerical Investigation of Aerogel Based Insulation Material for Aerospace Applications

It is extremely important to meet thermal insulation requirements in aircraft to ensure appropriate operational conditions, maintain structural integrity, and achieve energy savings and cost savings. In particular, it is critical to keep the external surface temperature of the pipelines through which hot gases or liquids pass at a certain level so that the aircraft operates under optimum temperature conditions. Silica-based aerogels, which are frequently used to provide this requirement, are high-performance thermal insulation materials. In this study, the operational performance and suitability for aviation of a composite insulation blanket containing aerogel was examined by using experimental and numerical methods.

Keywords: Composites, Thermal insulation, Insulation material, Aerogel

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 29 Ağustos 2024

Kabul: 1 Haziran 2025

*Sorumlu yazar: Furkan Karaboğa

E-mail: furkan.karaboga@tai.com.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1540431>

1. INTRODUCTION

Thermal management in aerospace is crucial for aircraft design and operation, involving the regulation and management of heat within various aircraft equipment and systems. Effective thermal management ensures that all parts of an aircraft operate within their optimal temperature ranges, enhancing performance, reliability, and safety. This involves dissipating excess heat from hot areas, protecting sensitive parts from extreme temperatures, and maintaining uniform temperatures across different sections of the aircraft. Sensitive areas, such as avionics and electronic equipment, require materials that can maintain stable temperatures and protect against thermal fluctuations. With their low thermal conductivity and excellent insulating properties, Aerogel blankets, with their low thermal conductivity and exceptional insulating qualities, are

well-suited for these applications, ensuring consistent and reliable performance [1–3].

Aerogel blankets represent a significant advancement in thermal insulation technology, offering substantial benefits for aviation applications. These materials are known for their remarkable thermal insulation properties, low density, high surface area, and versatility, making them highly suitable for various aerospace uses. Silica aerogels are typically synthesized by replacing the liquid in a gel with gas, resulting in a highly porous and low-density solid structure. Despite their outstanding thermal properties, the intrinsic fragility of silica aerogels presents challenges in their synthesis, scale-up, and direct application. To overcome these challenges, composite materials integrating aerogels, referred to as aerogel insulation blankets, have been developed by researchers [4]. These composite

materials incorporate silica aerogels with substrates to improve mechanical properties while maintaining thermal insulation capabilities. This unique nanostructure allows aerogels to achieve low thermal conductivity, substantially better than conventional insulation materials like fiberglass and foam. Ceramic fiber blankets impregnated with silica aerogel provide a high-performance insulation solution for the aviation sector by fusing the mechanical strength of ceramic fibers with the extremely low heat conductivity of silica aerogels (0.015–0.020 W/m·K). These blankets are perfect for situations where weight reduction and thermal efficiency are crucial because of their outstanding thermal insulation, lightweight design, and strong durability. Aerogel blankets perform better in terms of fire safety and thermal resistance than other insulation materials including mineral wool, fiberglass and polyurethane foam as can be seen in Table 1. They offer modest acoustic insulation, are hydrophobic to stop moisture absorption, and can tolerate temperatures of up to 650°C. In contrast to mineral wool, which is excellent at dampening sound, the trade-offs are a slightly lower acoustic insulation and a higher cost. Traditional materials, such as fiberglass and polyurethane foam, are lighter and less expensive, but they don't have the moisture resistance and thermal stability needed in high-temperature aviation settings. Therefore, although silica aerogel blankets are more expensive, they are a smart investment for aircraft applications where weight reduction, thermal efficiency, and fire safety are more important than initial material costs [4–12].

Aerogel blankets are typically synthesized using dip-coating, immersing a substrate into a sol-

gel solution and withdrawing it to form a coating. However, dip-coating has limitations, particularly in achieving uniform coatings on fibrous and porous materials, resulting in uneven or incomplete layers. The vacuum infusion method has been adopted for its benefits in infusing the fibrous matrix with the aerogel sol-gel solution, ensuring proper coating to the substrate and enhancing durability and efficiency [14,15].

Aerogel blankets have emerged as an innovative material in thermal management due to their exceptional insulating properties. High-temperature areas like engine and exhaust systems demand robust insulation to protect adjacent components and reduce heat loss. Aerogel blankets are well-suited for these applications due to their ability to withstand high temperatures while providing superior thermal resistance. Passenger cabins also benefit from aerogel blankets through improved thermal comfort, as these materials prevent heat and minimize heat loss in cold environments, enhancing passenger comfort and contributing to energy efficiency. Fuel systems require insulation to maintain consistent fuel temperatures, essential for efficiency and safety. Aerogel blankets provide thermal stability to prevent temperature-induced changes in fuel properties, ensuring optimal performance. The wings and fuselage of an aircraft are exposed to varying external temperatures during flight, making effective insulation crucial for maintaining integrity and performance. Due to their lightweight and durable nature, aerogel blankets protect against temperature variations and preserve structural efficiency and safety [1,16,17].

Table 1. Comparative analysis of insulation materials [7-13]

Attribute	Aerogel Blankets	Fiberglass	Polyurethane foam	Mineral Wool
Thermal conductivity	0.015 – 0.020 W/m.K	0.030 – 0.040 W/m.K	0.022 – 0.040 W/m.K	0.035 – 0.045 W/m.K
Density	0.15 – 0.20 g/cm ³	0.03 – 0.10 g/cm ³	0.03 – 0.06 g/cm ³	0.12 – 0.25 g/cm ³
Temperature Resistance	Up to 650 °C	Up to 500 °C	Up to 250 °C	Up to 700 °C
Mechanical Flexibility	Good (reinforced with fibers)	Good	Excellent	Moderate
Moisture Resistance	High(Hydrophobic treatment)	Moderate	Low	Moderate
Fire Resistance	High	Moderate	Low (unless treated)	High
Acoustic Insulation	Good	Good	Moderate	Excellent
Cost	High	Low	Low to moderate	Moderate

The application of aerogel blankets in aviation extends beyond thermal insulation. Their lightweight nature significantly contributes to overall weight reduction in aircraft, enhancing fuel efficiency and payload capacity. This advantage is crucial for commercial and military aviation sectors, where every weight saved leads to substantial cost savings and improved performance. Additionally, the flexibility and durability of aerogel blankets allow for easy installation and maintenance, even in complex or constrained spaces. This versatility makes them suitable for a wide range of applications within the aircraft, from engine compartments to passenger cabins. Fire safety is another critical benefit of aerogel blankets. Their excellent fire-resistant properties enhance aircraft safety by providing additional protection against potential fire hazards. This fire resistance ensures passenger and crew safety and protects valuable equipment and structural components. Moreover, aerogel blankets modified with hydrophobic properties resist moisture, making them suitable for high-humidity environments. This moisture resistance prevents corrosion of critical components, extending the lifespan and reliability of the aircraft [1,16].

Aerogel synthesis is a detailed chemical process, Methyltrimethoxysilane (MTMS) precursors are gaining interest in synthesizing aerogels as they shorten processing times, improve drying, and eliminate hydrophilization. Due to methyl group formation, MTMS-based methylsilsequioxane (MSQ) aerogels resist capillary forces during drying. These aerogels can be synthesized in situ within ceramic blankets using the vacuum infusion sol-gel method (VASI). Ceramic fibers, suitable for aerospace applications, withstand temperatures up to 1800°C and offer superior thermal stability, insulation, and resistance to corrosion and chemicals compared to fiberglass. They also do not degrade or release toxic gases at high temperatures, making them ideal for demanding environments [18].

This study highlights aerogel blankets as a highly effective solution for heat management in aviation, offering superior thermal insulation, lightweight properties, flexibility, and durability. Their application across various thermal zones in aircraft enhances safety, efficiency, and performance, making them a vital component in modern aircraft design. As the demand for advanced materials in aerospace continues to grow, aerogel blankets are expected to play an increasingly important role, driving innovations and improvements in aircraft design and performance. Within the scope of this study, the thermal response, thermal conductivity variation with density, and temperature of MSQ aerogel blankets have been investigated. The thermal response of the blankets' outer surface was analyzed

numerically and experimentally. This research aims to enhance the understanding of MSQ aerogel blankets' thermal properties for advanced insulation applications.

Regarding the incorporation of aerogel materials with flexible insulation blankets designed for particular aerospace applications, there is a notable gap in the literature. Developing a novel vacuum infusion technique to infuse ceramic fiber blankets with a silica aerogel solution is what makes our study novel. Through the method of directly generating the aerogel within the blanket fibers, a highly uniform dispersion of aerogel is achieved, leading to improved thermal insulation efficacy. In addition, our method enables the custom production of insulating materials that are precisely suited to the distinct geometries and specifications of aircraft components, in contrast to commercially available insulation materials that frequently need to be cut and joined to match complex geometries. This technique addresses important issues in the aerospace sector when traditional off-the-shelf products fail to meet complicated design and performance criteria. It not only increases insulation efficiency but also decreases material waste and installation time. Moreover, a test system specific to the part to be used in the aircraft, which is rarely seen in the literature, was developed and the produced aerogel blankets were tested on this device. Thus, the performance of the blankets was directly examined for the area of use without comparing them according to their thermal conductivity coefficients. In addition to the experimentally examined thermal performance, numerical studies were also carried out and the results were compared.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Materials

Trimethoxymethylsilane (MTMS, 98%), hydrochloric acid (HCl, 37%), ammonia solution (NH₄OH 25%), and n-hexane were obtained from Sigma Aldrich. Absolute ethanol (EtOH, 99.9%) was obtained from Honeywell Riedel-De-Haën. The chemical substances were used as received, with no additional processing. Deionized water (DI) was utilized consistently in all experiments. The ceramic insulation blankets (BLANKET 1260) were obtained from ETS Endustriyel, Turkey.

2.2. Production of aerogel blankets

The MTMS sol was prepared using a two-step acid-base sol-gel process detailed in the literature [18]. A constant 2:1 EtOH-H₂O ratio was maintained as the solvent. Aerogels were prepared with MTMS in weight percentages of 10% and 30%. Hydrolysis

of MTMS began in an acidic environment with a 0.05 M HCl catalyst, reaching a pH of 2, and was stirred for about 6 hours. The pH was then adjusted to 10 with a base catalyst and mixed for 20 minutes. The VASI method synthesized MSQ aerogel-blanket composites. This method is advantageous for large-scale production as it moderates gravitational effects by applying the coating fluid perpendicular to gravity, ensuring uniform sol distribution, and enhancing properties like thermal conductivity and mechanical strength. Gelation occurs over 12 hours, followed by flushing with ethanol to remove by-products and water. The aerogel blankets are aged in ethanol, immersed in n-hexane to remove residuals, and dried in an oven at 60°C for 8 hours and 140°C for 6 hours.

2.3. Thermal Performance Tests

To evaluate the insulation performance of the produced aerogel blanket system, a spiral coil resistance heating system was installed into a pipe which is produced from Inconel steel with a thickness of 2 mm. The resistance system has 1800 W power, and it is controlled by a PID system in which the temperature of the outer surface is measured via a k-type thermocouple. When the set temperature level is reached, the system controller keeps the temperature at a constant level throughout the experiment. The system has approximately $\pm 10^\circ\text{C}$ accuracy. In addition, the temperature distribution on the pipe and blanket surface was measured via a thermal camera system, Flir T530. In Figure 1, the test and measurement system are depicted. The thermal camera system needs to be calibrated for the emissivity value of the samples. Therefore, the temperature level measured by a thermocouple is used to calibrate the thermal camera, and the emissivity value is determined as 0.72 for the tested aerogel blanket at 580°C.

2.2 Finite Element Modelling of Insulated Pipe

Thermal analyses were carried out via Comsol Multiphysics software to estimate the thermal performance of an aerogel blanket covered around a stainless steel pipe and compared with experimental results. The model of blanket as 3D with a diameter of 64 mm and length of 200 mm was generated. Blanket was set as a solid material for simplicity. Meshes were created using Comsol Multiphysics and hexahedral element type was used. Then, heat transfer in solids was selected as physics of analysis. As a boundary conditions, 580°C inner surface temperature is set as thermal load and, convection and radiation which mimic the experimental setup were used to apply the simulations. The emissivity and heat transfer coefficients of exposed surfaces were taken as 0.7 and 10 W/(m².K) respectively. The required physical properties of the aerogel for the simulations such as thermal conductivity, density and specific heat, were determined from the related tests. Moreover, thermal conductivity variation with density and temperature is obtained from literature [19]. One of the essential points for the manufacturing of the aerogel materials is the density, which can affect the thermal conductivity. In Figure 2, the variation of the thermal conductivity with respect to the density for different temperature levels is given. As can be seen from the figure, the sensitivity of thermal conductivity of the aerogel materials is very high at higher temperature levels. However, this relation decreases at lower temperatures. In addition, the variation of the thermal conductivity with temperature was depicted in Figure 2, and it increases with the temperature increase. Since this variation is remarkable with the increased temperature, thermal conductivity of the blanket domain is defined as a function which is given in Eq.1 where a and b are the constants, and the values are taken as 0.0135 and 0.0024 respectively.



Figure 1. The thermal performance test device

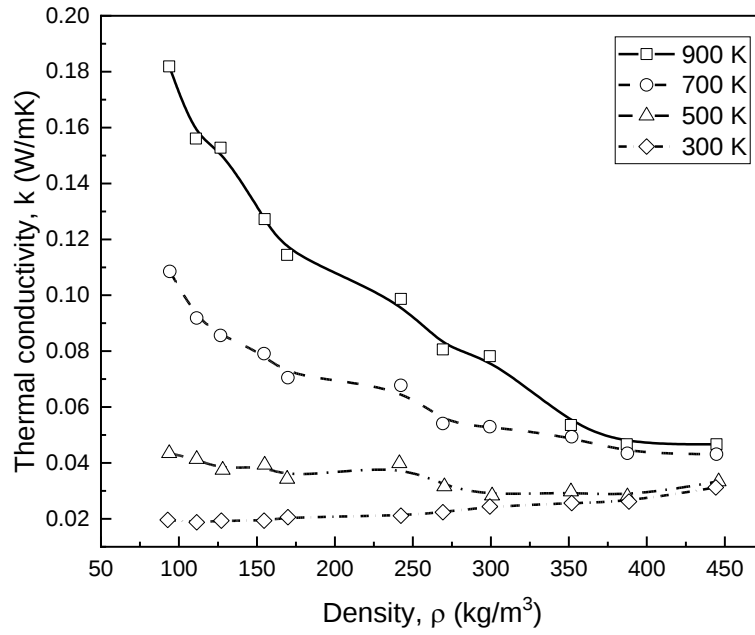


Figure 1. Thermal conductivity variation with density and temperature [19]

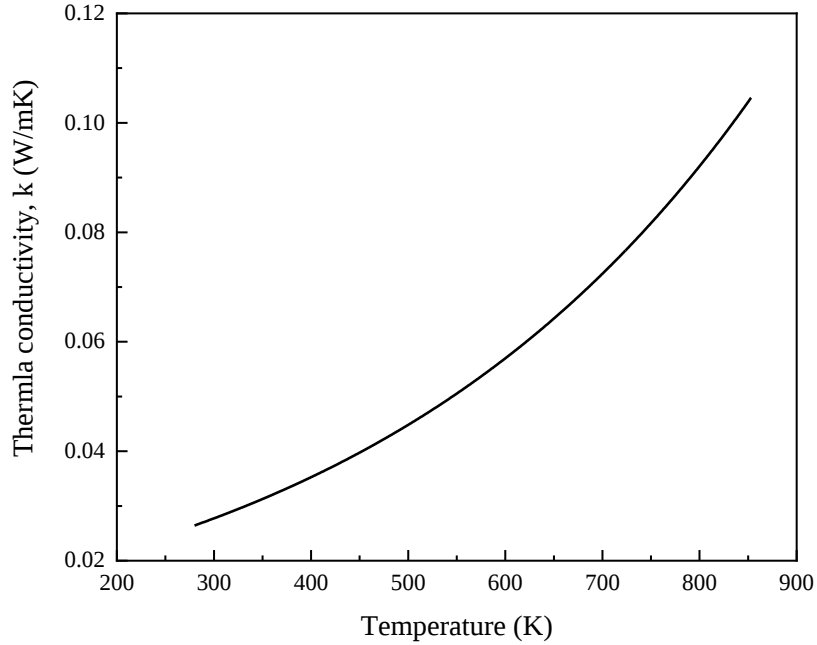


Figure 2. Thermal conductivity variation with temperature

$$k(T) = a * \exp(b * T) \quad (1)$$

Table 2. Material data

Material	10 MTMS
Density (kg/m ³)	310
Specific Heat (J/g.K)	1800

Similar to the experimental system which represents an aircraft pipeline, a cylindrical section was designed. Inconel 718 was selected as pipe material since it has common usage for such

applications. To use the structural meshing technique, partition was applied to the pipe's and insulation blanket's vertical and horizontal sections which is illustrated in Figure 3. Meshed parts are shown in Figure 4. 20 elements are used along the quarter edge of pipe which means 80 elements totally for a circular edge of the pipe and blanket. Moreover, 3 elements are used through thickness direction and 50 elements throughout the length of both the blanket and metal pipe.

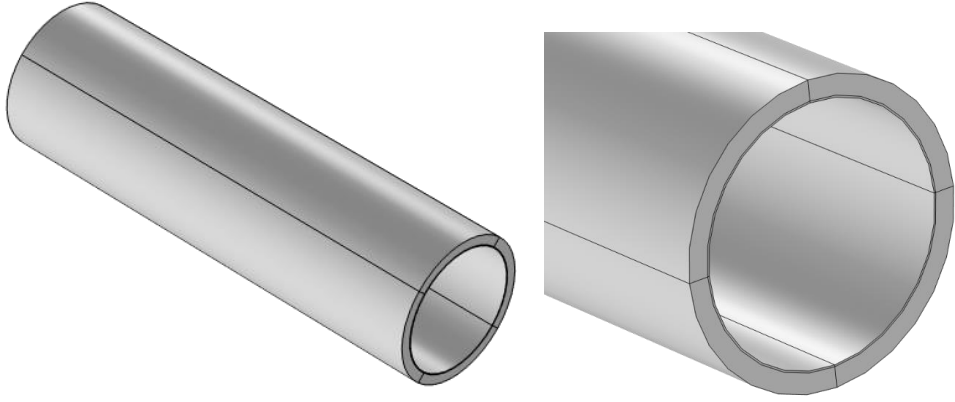


Figure 3. Geometry of metal pipe and aerogel blanket

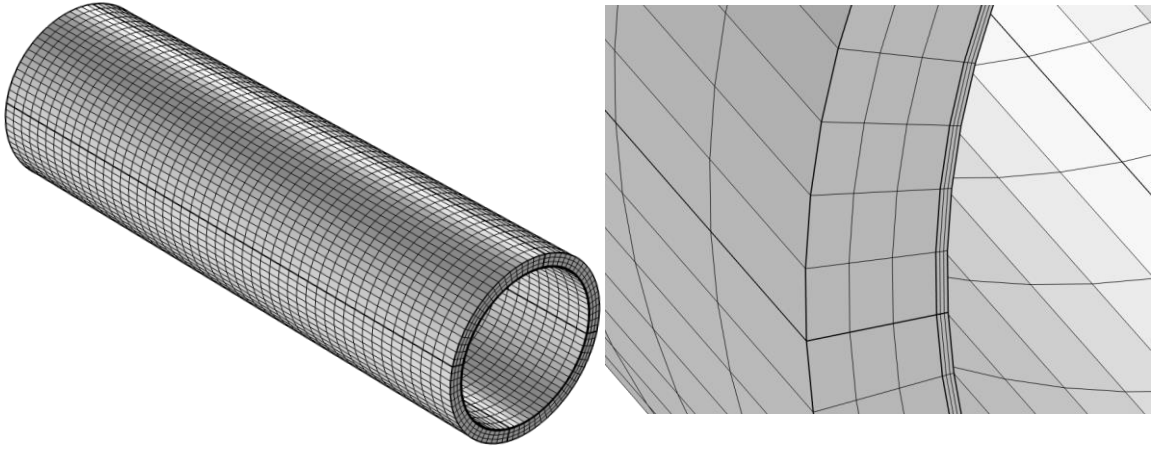


Figure 4. Model mesh structure.

3. Results and Discussion

3.1. Experimental results of insulated pipe

Thermal performance tests on the aerogel blanket insulation system were conducted at a high temperature of 580 °C. During these tests, temperatures on the surface of the aerogel blanket were monitored using a thermal camera and a K-type thermocouple system, both of which are widely used in high-temperature measurement applications due to their reliability and accuracy.

The maximum temperature recorded by the thermocouple on the outer surface of the blanket was 166 °C. This considerable difference between the inner surface temperature (580 °C) and outer surface temperature (166 °C) highlights the effectiveness of the aerogel blanket in insulating against difficult conditions since it has low thermal conductivity.

Hence, it performed better than similar products in literature [20,21]

The porous structure of the aerogel blanket also means that minor peak temperatures could be detected on certain parts of the surface. These peaks likely result from variations in pore size and distribution, which can cause localized heat transfer on the surface. However, these peaks were not substantial enough to impact the overall thermal stability.

Temperature measurements were consistently taken over a 30-minute period. Throughout this time, no significant changes in the surface temperature were observed, suggesting that the aerogel blanket maintained a stable thermal barrier without degradation or fluctuations. This stability over time further reinforced the blanket's thermal insulation

performance, demonstrating that it can reliably insulate against high temperatures for extended durations without losing effectiveness.

In summary, the results indicate that the aerogel blanket provides a satisfactory level of insulation, effectively protecting against high temperatures while maintaining surface stability. This characteristic makes it a promising candidate for applications requiring high thermal resistance like aerospace applications.

3.2. Numerical Results

In Figure 5, thermal response of the outer surface of 10% MTMS blanket is presented numerically. The temperature on the front face of the blanket was stabilized after 20 minutes and the outer face temperature was found as 173.04 °C numerically whereas 166 °C was experimentally recorded with a thermocouple. During the simulation there is fully thermal contact between aerogel blanket and pipe, was assumed. This assumption implies that there was no gap or air pocket between the blanket and the pipe, allowing direct heat transfer from the pipe to the blanket. By assuming full contact, any potential heat loss that might occur at the blanket-pipe interface is ignored, simplifying the simulation and focusing on the aerogel's intrinsic thermal insulation properties. Neglecting heat loss at the interface creates a more controlled model to analyze the blanket's response without needing to account for the influence of gaps or contact resistance. The 7.04 °C

difference between the numerical and experimental values suggests that the simulation effectively represents the thermal behavior, with minor discrepancies possibly arising from real-world factors such as slight material inconsistencies or thermocouple precision and assumptions in the numerical model.

3.3. Discussion

The experimental and numerical results obtained in this study underscore the exceptional thermal performance of aerogel blanket insulation systems, particularly under high-temperature conditions. The significant temperature gradient observed (580 °C on the inner surface to 166 °C on the outer surface) highlights the aerogel blanket's ability to maintain effective thermal insulation. This aligns with the established literature on aerogels, which emphasizes their low thermal conductivity and high-temperature resistance, often attributed to their nanoporous structure. The minor surface temperature peaks detected during the experimental tests further corroborate the influence of microstructural heterogeneity, such as variations in pore size and distribution, on localized heat transfer. In order to overcome these peaks aerogel can be distributed on the blanket homogeneously. Moreover, the difference between numerical and experimental results can be eliminated by establishing the model closer to reality.

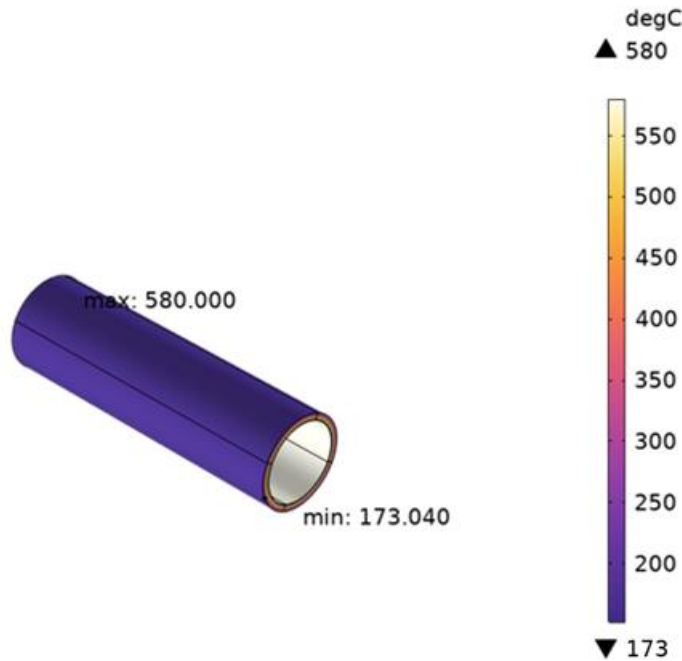


Figure 5. Temperature distribution of aerogel-blanket and Inconel steel.

4. CONCLUSION

In the study, insulation performance of the produced aerogel blanket was determined via covering a pipe made of Inconel stainless steel which mimics the exhaust system of aircrafts, experimentally and numerically. The simulation results showed good agreement with the experimental results and the maximum difference is about 4%. In addition, it is understood that the produced aerogel blanket can insulate such a hot pipe exhaust system according to requirements. Therefore, these aerogel blankets can be ideal candidates for multiple areas. For engine usage, they can effectively insulate the exhaust system, reducing heat transfer to surrounding components and improving engine thermal management. In the passenger cabin, aerogel blankets can help maintain a comfortable environment by minimizing heat intrusion from the surrounding heat sources, contributing to overall thermal comfort. Additionally, their excellent insulation properties can play a crucial role in preventing heat from avionics, shielding sensitive electronic equipment from excessive temperatures and ensuring reliable operation.

ÖZET

Hava araçlarında, uygun operasyonel koşulların sağlanması, yapısal bütünlüğün korunması, enerji tasarrufu ve maliyet konularında kazanım elde edilmesi için ısı yalıtım isteklerinin yerine getirilmesi son derece önemlidir. Özellikle, sıcak gaz veya sıvıların geçtiği boru hatlarının dış yüzey sıcaklığının belirli bir seviyede tutulması ve böylece hava aracının optimum sıcaklık şartlarında faaliyet göstermesi kritiktir. Bu isteri sağlamak için sıklıkla kullanılan silika bazlı aerogeller yüksek performanslı ısı yalıtım malzemeleridir. Bu çalışmada, aerogel katkılandırma ile elde edilen kompozit bir yalıtım battaniyesinin deneysel ve nümerik olarak performansı incelenip havacılığa elverişliliği irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozitler, Isıl yalıtım, Yalıtım malzemesi, Aerogel

ACKNOWLEDGEMENT

Authors thank Eray Koştur for design support.

REFERENCES

1. Easa., Easy Access Rules for Large Rotorcraft (CS-29) Amendment 11, 2023. <http://eur-lex.europa.eu/>.
2. N. Bheekhun, A.R. Abu Talib, M.R. Hassan., (2013) Aerogels in aerospace: An overview, Adv. Mater. Sci. Eng. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/406065>.
3. M.A. Hasan, R. Sangashetty, A.C.M. Esther, S.B. Patil, B.N. Sherikar, A. Dey., (2017) Prospect of Thermal Insulation by Silica Aerogel: A Brief Review, J. Inst. Eng. Ser. D. 98 297–304. <https://doi.org/10.1007/s40033-017-0136-1>.
4. M.A. Aegerter, N. Leventis, M.M. Koebel, S.A.I. Steiner., (2022) Handbook of Aerogels.,
5. Z. Sheng, Z. Liu, Y. Hou, H. Jiang, Y. Li, G. Li, X. Zhang., (2023) The Rising Aerogel Fibers: Status, Challenges, and Opportunities, Adv. Sci. 2205762 1–32. <https://doi.org/10.1002/advs.202205762>.
6. T. Xue, C. Zhu, X. Feng, Q. Wali, W. Fan, T. Liu., (2022) Polyimide Aerogel Fibers with Controllable Porous Microstructure for Super-Thermal Insulation Under Extreme Environments, Adv. Fiber Mater. 4 1118–1128. <https://doi.org/10.1007/s42765-022-00145-8>.
7. Hoseini A, Malekian A, Bahrami M., (2016) Deformation and thermal resistance study of aerogel blanket insulation material under uniaxial compression. Energy and Buildings. Oct 15;130:228–37.
8. Lakatos Á, Csík A, Csarnovics I. (2021) Experimental verification of thermal properties of the aerogel blanket. Case Studies in Thermal Engineering. Jun 1;25:100966.
9. Čubrić G, Salopek Čubrić I, Rogale D, Firšt Rogale S. (2021) Mechanical and thermal properties of polyurethane materials and inflated insulation chambers. Materials. Mar 21;14(6):1541.
10. Gama NV, Ferreira A, Barros-Timmons A. (2018) Polyurethane foams: Past, present, and future. Materials. Sep 27;11(10):1841.
11. Aditya L, Mahlia TI, Rismanchi B, Ng HM, Hasan MH, Metselaar HS, Muraza O, Aditiya HB. (2017) A review on insulation materials for energy conservation in buildings. Renewable and sustainable energy reviews. Jun 1;73:1352–65.
12. Pásztor Z. (2021) An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. Journal of Building Engineering. Dec 1;44:102604.
13. N. Hebalkar, K.S. Kollipara, Y. Ananthan, M.K. Sudha, Nanoporous., (2019) Aerogels for Defense and Aerospace Applications., https://doi.org/10.1007/978-3-319-73255-8_5-1.
14. X. Tang, X. Yan., (2017) Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications, J. Sol-Gel Sci. Technol. 81 378–404. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4197-7>.
15. Y. Liu, C. Yuan, C. Liu, J. Pan, Q. Dong., (2019) Study on the resin infusion process

- based on automated fiber placement fabricated dry fiber preform, Sci. Rep. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43982-1>.
16. **M. Ahlers., (2020)** An Introduction to Aircraft Thermal Management,. <https://doi.org/10.4271/9780768095524>.
17. **S.D. Sharma, L. Sowntharya, K.K. Kar., (2016)** Polymer-based composite structures: Processing and applications. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8_1.
18. **A. Tav, Y. Oz, · Halil, I. Akyildiz., (2023)** Formation and thermo-physical properties of aerogel ceramic blanket composites synthesized via scalable atmospheric pressure process with methyltrimethoxysilane precursor, J. Porous Mater. 2023. 1 1–18.
- <https://doi.org/10.1007/S10934-023-01521-4>.
19. **Qu, ZG., Fu, YD., Liu, Y., Zhou, L., (2018)** “Approach for predicting effective thermal conductivity of aerogel materials through a modified lattice Boltzmann method”, Applied Thermal Engineering, 132:730–9.
20. **M. Ibrahim, P.H. Biwole, E. Wurts, P. Achard (2014),** A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating, Build. Environ. 81 112–122.
21. **U. Berardi, R.H. Nosrati (2018),** Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions, Energy 147 1188–1202.

Namık Kılıç* 

BİAS Mühendislik, Haluk Türksoy Sok. No:12/3
Altunizade 34662 İstanbul TÜRKİYE

MEF Üniversitesi, Huzur Mah. Maslak Ayazağa
Cad. No.4 34396 İstanbul TÜRKİYE

Sarper Özcan 

BİAS Mühendislik, Haluk Türksoy Sok. No:12/3
Altunizade 34662 İstanbul TÜRKİYE

Berkman Kantar 

BİAS Mühendislik, Haluk Türksoy Sok. No:12/3
Altunizade 34662 İstanbul TÜRKİYE

Makale Bilgisi:
Araştırma Makalesi
Gönderilme: 28 Aralık 2024
Kabul: 14 Kasım 2025

*Sorumlu Yazar: Namık Kılıç
Email: nkilic1584@hotmail.com

DOL: <https://doi.org/10.56193/matim.1608585>

Tasarımda Altı Sigma Yöntemi ile Statik İvme Test Düzenliği Tasarımı

Çalışmada, havacılık, uzay ve kara platformlarında operasyonel yükler sebebiyle maruz kalınan yüksek ivme seviyelerinin test edilmesine yönelik santrifüj statik ivme test sisteminin Tasarımda Altı Sigma yöntemi ile geliştirilmesi aşamaları anlatılmaktadır. İlk aşamada gerçekleştirilen Kalite Fonksiyon Açılımı ile müşteri gereksinimleri teknik isterlere dönüştürülmüştür. İkinci aşamada Tasarım Hata Modu Etki Analizleri ve kavramsal tasarım yöntemleri ile olası tasarım zayıflıkları ve riskler değerlendirilmiştir. Daha sonra test platformunun güvenli ve yüksek performansta çalışması ve testler sırasında oluşacak güç ihtiyacının azaltılmasına yönelik yapısal optimizasyon çalışması, deney tasarımı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca çeşitli Tasarımda Altı Sigma araçları kullanılarak, ilk seferde doğru tasarım hedeflenmiştir. Oluşturulan veriler ışığında test platformunun güvenli ve fonksiyonel şekilde çalışması için gerekli olan detay tasarım tamamlanmıştır. Yapılan validasyon çalışmaları ile statik ivme test sistemi kullanıma hazır hale getirilmiştir. Proje performans parametreleri karşılaştırılarak, uygulanan ürün geliştirme metodunun klasik Faz Geçiş yöntemine göre etkinliği gösterildi.

Anahtar Kelimeler: Tasarımda altı sigma, Faz geçiş metodu, Kalite fonksiyon açılımı, Deney tasarımı, Taguchi sağlam parametre tasarımı, Santrifüj statik ivme test cihazı

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında yoğun rekabet ve sürekli güncellenen müşteri talepleri, organizasyonları ve kurumları yeni ürünlerin kaliteli ve hızlı olarak tasarlanmasına odaklamıştır. Sürdürülebilir karlılık hedefleri, değişen pazar koşullarına uyacak şekilde ürün geliştirme süreçlerinin evrimleşmesini gerekli kılmıştır. 90'lı yılların başından itibaren proje yönetiminde ve yeni ürün geliştirme sürecinde yaygın olarak Faz Kapısı (Robert Cooper Stage-Gate) metodolojisi kullanılmaktadır [1-2]. Bu yöntemin pek çok farklı versiyonu halen geniş kitleler tarafından kullanılmaktadır. Aynı zamanda, güncel çalışmalar ürün ömür yönetimi (PLM), yeni ürün geliştirme ve

devreye alma (NPDI), yalın ürün geliştirme (LPD) veya toplam kalite yönetimi (TQM) gibi farklı yaklaşımlar ve yöntemlerin son yirmi yılda artan oranda uygulandığını göstermektedir [3,4]. Klasik ürün geliştirme sürecinde ürün gereksinimleri hiyerarşik olarak ürünün kalitesini etkilemektedir. Diğer bir ifade ile, tasarım, prototip, doğrulama ve seri üretimden gelen kalitesel sorunlar kümülatif olarak ürünün kalitesini azaltmaktadır ve hataların doğal olarak ilgili faz geçilirken tespit edilip giderilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu süreç yaklaşımı hataların projenin ileri safhalarında tanımlanabilmesi sebebiyle yüksek maliyetler ile çözülmesine sebep olmaktadır.

Tasarımda Altı Sigma (DFSS- Design For Six Sigma) yaklaşımı, kullanıcı taleplerini değer, kalite,

güvenirlik ve maliyet açısından yararlı tasarım çözümlerine dönüştürmeyi sistematik ve bilimsel bir yöntemle ele alan bir geliştirme sürecidir [5-7]. 25 yıldan uzun bir süredir Altı Sigma, ürün ve süreçlerin kalitesini iyileştirmek için en etkili metodolojilerden biri olarak kabul edilmektedir ve sektör lideri pek çok kurum tarafından şirket felsefesi şeklinde uygulanmaktadır [8]. Altı Sigma stratejisi kapsamında gerçekleştirilen projeler ve çalışmalar DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) problem çözme modeline dayanmaktadır [5,9]. Üretim proseslerinin optimizasyonuna odaklanan projeler çoğunlukla DMAIC metodolojisini takip ederken, yeni ürün geliştirmeyi amaçlayan projelerde sistematik yaklaşımlardan daha çok, geleneksel ürün geliştirme süreçleri uygulanmıştır [5]. Bu süreçlerde konsept geliştirme ve tasarım alternatiflerinin sistematik bir yaklaşımla seçilmesi ve en iyi hale getirilmesi çalışmaları yeterince ön plana alınmadığı için ancak sonradan üründe yapılacak düzeltmelerle istenilen kalite seviyesine ulaşılmaktadır. Endüstride kalite iyileştirme çalışmaları klasik Faz Kapısı metodunun uygulanması sebebiyle bazı basit altı sigma araçları kullanılsa bile zafiyetleri üretim aşamasında çözmeye çalışmaktadır. Oysa, başarılı bir ürün geliştirme ve tasarım sürecinde prototip safhasından önce problemlerin ve tasarım zayıflıklarının tanımlanması ve sağlam (robust) tasarım yöntemleri ile bu zayıflıkların giderilmesi hedeflenmelidir. Özetle, DFSS stratejisinin temel unsuru, ürün iyileştirmede kullanılan yöntemlerin ve kalite iyileştirme araçlarının tanımlı bir metodolojiyle konsept tasarım aşamasından itibaren uygulanmasıdır [5].

DFSS'de amaç, güvenilir ve sağlam tasarımların, uzun süreli karlılık, müşteri memnuniyeti ve yüksek pazar payı sağlamasıdır. Aynı zamanda süreç, ürün için kritik olan özellikleri etkin bir şekilde adreslemeli, proje maliyeti ve riskleri azaltmalıdır. Literatürde DFSS yönteminin etkinliğinin performans kriterleri açısından klasik süreçlerle karşılaştırıldığı pek çok çalışmaya rastlıyoruz. Bu çalışmalarda DFSS araçları çeşitli seviyelerde kullanılmakta olup, çalışmalar arasında değişkenlikler göstermektedir. Su ve Su tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, LCD panel tasarımında DFSS uygulanmadan önce seri üretim verimliliği %86.36 olarak ölçüldü [10]. Yeni ürün geliştirme süresince Kalite Fonksiyon Dağıtımı (QFD), Hata Modu ve Etki Analizi (FMEA), TRIZ, Deney Tasarımı (DOE) ve Taguchi yöntemi uygulandıktan sonra bu oran %99.63'e çıkmıştır. İade oranları %7.08'den %1.54'e düşmüş ve oluşan yıllık ilave 600.000 satış adedi sayesinde ürün başına geliştirme maliyetleri azalmıştır [10]. Rafiee ve Faiz tarafından sabit miktatlı motorlarda yapılan bir çalışmada ürün maliyetlerinde klasik ürün geliştirme sürecine göre parça başı ilave 9 USD'lik artışla

hata olasılık değeri %80.2'den sıfıra indirilmiştir. Bu çalışmada özellikle optimizasyon ve deney tasarımı sürecine odaklanıldığı görülmektedir [11]. Nada ve diğ. tarafından ayak kaval kemiği implantında DFSS uygulanarak kayma gerilmelerinde %50'ye varan azalma ve diz ağrılarında %30'a varan iyileşme görülmüştür [12]. Rane ve diğ. tarafından yapılan çalışmada ise devre kesici tasarımında DFSS araçlarından parametre diyagramı, SWOT analizi, Kano modeli, Sebep-Sonuç diyagramları, Pareto analizi, ANOVA analizi kullanılmıştır. Güvenirlik değerleri %61.76 dan %98.17'ye çıkarılmıştır [13]. Benzer şekilde pek çok sektörde DFSS araçları uygulanan çalışmalarda, süre, maliyet, pazar payı, güvenirlik değerlerinde belirgin kazançlar elde edildiği görülmektedir [14-16].

Genel olarak, mevcut tasarım yöntemlerinin çoğu doğası gereği deneyseldir. Oluşturulan alternatifler çoğunlukla, diğer firmalar tarafından pazara sunulan önceki ürünlerin kıyaslanmasından ve rakip analizlerinden yola çıkarak tasarım ekibinin en iyi düşüncelerini temsil ederler. Ancak, ne yazık ki, sezgisel olarak oluşturulan tasarım çözümleri bilimsel temelden yoksundurlar ve zayıflıklar veya eksiklikler barındırırlar [5]. DFSS yaklaşımı, tasarım ve geliştirme sürecine yardımcı olan [5,17-19] ve projenin niteliğine bağlı olarak uygulanabilen çok çeşitli metodolojiler sunar. DFSS'in pek çok tanımı ve örneği olmakla birlikte en yaygın olarak adlandırılan **IDOV (Tanımlama, Tasarım, Optimize Etme, Doğrulama)** [5] metodolojisidir. DFSS, yeni bir ürün veya teknolojinin pazar başarısını en üst düzeye çıkarmaya yardımcı olabilecek güçlü ve karmaşık bir mekanizmadır. Bununla birlikte, bu metodolojide ürün tasarımına analitik bir yaklaşım benimsendiğinin altı çizilmelidir.

Üretici, tasarım sürecinin erken bir aşamasında kritik özellikleri belirleyerek, müşteri memnuniyeti üzerinde en yüksek etkiye sahip olan ürün parametrelerini geliştirmeye odaklanır. IDOV metodolojisi, kritik müşteri gereksinimlerinin hiçbirinin ihmal edilmemesini garanti eder. Tasarım süreci söz konusu olduğunda, sonraki aşamalarda ürün kalitesini ve müşteri beğenisini gösterebilecek özellikleri nasıl seçtiğimiz önemlidir. Literatür, müşterinin kritik özelliklerini öngörmeye yardımcı olmak için tasarlanmış bir dizi hazır yöntem ve araç sunar. Bu araçlar beyin fırtınası, kontrol listeleri, Kano modeli, ağaç diyagramları gibi nispeten basit veya QFD, FMEA gibi daha karmaşık çalışmaları içerebilir [5,6,19,20].

Ürünlerdeki değişkenlik ve hedeflenen kritik performans metriklerinin farklı olması Tanımlama, Tasarım, Optimize Etme, Doğrulama aşamalarını değiştirmemekte fakat her bir aşamadaki kullanılan

araçları farklılaştırabilmektedir. Her bir DFSS aşamasında potansiyel olarak kullanılan araçlar Şekil-1 de özetlenmiştir. Bhat ve diğ. tarafından yapılan ilginç bir çalışmada Hindistan'da DFSS metodu kullanan firmalarda tasarımıdaki kritik hata faktörlerinin hangi araçları ön plana çıkardığı incelenmiştir [4]. Çeşitli tecrübe ve demografik yapıda 500'den fazla sektör uzmanıyla yapılan anket çalışmalarında belirlenen on sekiz kritik hatanın DFSS prosesleri ile ilişkisi istatistik yöntemler ile incelenmiştir. Projedeki hataların özellikle tanımlama ve analiz safhasında çıktığı ve Müşterin Sesi çalışmalarının en güçlü parametre olduğu görülmektedir [4]. Fancisco ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, DFSS uygulandığında dayanıklı tüketim ürünlerinde fayda beklenen yedi ana başlıkta iyileşmeye nasıl bir katkı vereceği incelenmiştir [21]. Uzmanların %80'i, DFSS yol haritasının ürün geliştirme sürecinin tüm beklentileri karşıladığını belirtmiştir. Kırk altı tasarım aktivitesinin %65'ini çok önemli olarak nitelendirmiştir. Özetle dayanıklı tüketim ürünlerinin geliştirilmesi DFSS yönteminin süre, maliyet, kalite ve güvenilirlik konularında konsept tasarımdan pazara sunulmasına kadar tüm aşamalarda uygulanmasının faydalarını nicelik olarak ortaya koymaktadır.

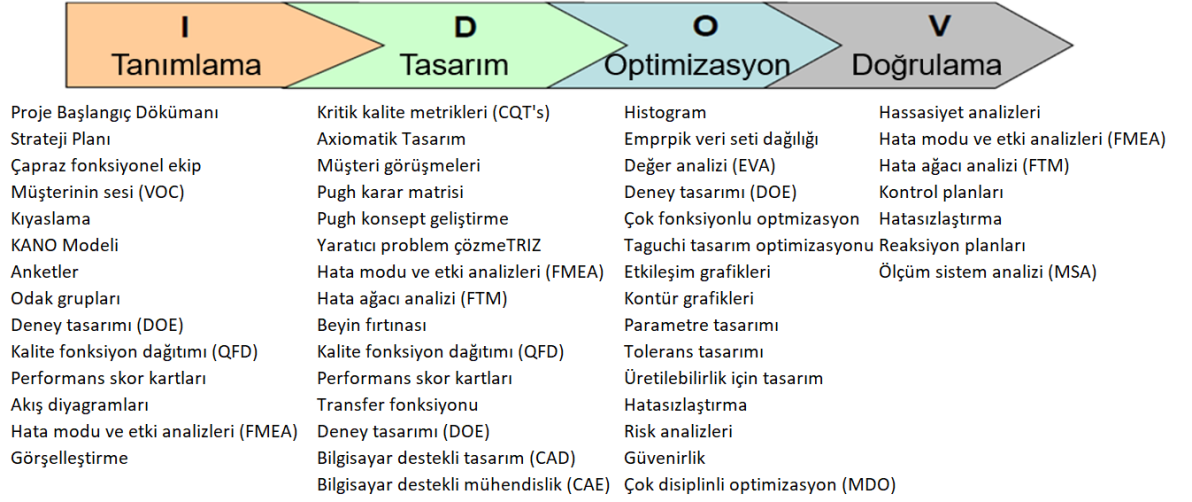
Dzulinski ve diğ. tarafından yapılan sistematik derleme çalışmasında, literatürdeki kitap ve makaleler incelenerek ürün geliştirme sürecinde belirlenen 72 aktivite, kullanılan DFSS aracına göre değerlendirilmiştir [3]. Bu çalışmada ürün geliştirme süreci; ilk, orta ve son seviye olarak kategorize edilmiştir. QFD, DOE ve FMEA'nin en etkin araçlar olduğu görülmektedir. İlk safhada belirtilen QFD %14.42, ikinci safhada DOE %11.82 FMEA %6.36, son safhada ise DOE'nin %12.2 ile öncelikli kullanılan araçlar olduğu görülmektedir.

Literatür araştırması sonucunda tanımlama aşamasında kullanılan en popüler araçlardan biri, müşterinin gereksinimlerini belirlemeyip anlamaya ve ölçülebilir teknik parametrelere dönüştürmeyi sağlayan QFD çalışmasıdır [5,22-26]. Bu çalışma aynı zamanda müşterinin sesi olarak da adlandırılmaktadır. QFD metodolojisi, müşterinin temel gereksinimlerini ve beklentilerini karşılamada önemli ölçüde yardımcı olur. Tasarım ve üretim sürecinin verimli bir şekilde kontrol edilmesini sağlamak için, müşterinin kritik gereksinimleri üzerinde en güçlü etkiye sahip olan teknik parametreler erken bir aşamada belirlenmelidir. DFSS bakış açısından yapılması gereken şey, QFD çalışmasından türetilen işlevsel gereksinimlerin optimize edildiğinden emin olmaktır. Dikkate alınması gereken faaliyetler arasında fiziksel ve süreç yapısı geliştirme, optimizasyon ve transfer fonksiyonu geliştirme, testler ve tasarlanmış

deneyler, doğrulama, güvenilirlik yöntemleri ve diğer DFSS algoritma faaliyetleri yer alır.

Tasarımda oluşabilecek hataların, ürüne dönüşmeden önce değerlendirilmesi, çok faydalı olacak bir risk analizi çalışmasıdır. Bu yönde 70'li yıllardan itibaren yaygın olarak kullanılan FMEA yönteminin tasarıma uygulanmasıdır [5,27,28]. DFMEA, öncelikle tasarımdan sorumlu ekip tarafından, mümkün olduğunca, olası hata modları ve bunlarla ilişkili nedenler ve mekanizmaların dikkate alındığından emin olmak için kullanılan bir analitik tekniktir [5]. İlgili her sistem, alt montaj ve bileşenle birlikte değerlendirilmelidir. Süreç, tasarımın ne yapması ve ne yapmaması gerektiğinin (yani, tasarım amacı) bir listesini geliştirerek başlar [29]. Müşteri istekleri ve ihtiyaçları dahil edilmelidir; bunlar QFD gibi kaynaklardan belirlenebilir. İstenen özelliklerin tanımı ne kadar iyi olursa, önleyici/düzeltilici eylem için olası Arıza Modlarını belirlemek o kadar kolay olur. Çalışmanın son aşamasında gerçekleştirilecek FMEA çalışması ile riskler tasarım sürecinin içine dahil edilecektir.

DFSS sürecinin en önemli aşamalarında biri optimizasyon sürecidir. Deney tasarımı ve optimizasyon tasarımın tüm zayıflıklarının giderilerek üretime ve doğrulamaya hazır hale getirilmesini içermektedir. Bu süreçte pek çok optimizasyon yöntemi kullanılmakta olup, karşılaşılan problemlerin içeriğine göre DOE ve optimizasyon metodu belirlenmektedir. Bu çalışmada tasarım parametreleri ile hedef fonksiyon arasında doğrusal bir ilişki beklendiği için yöntem olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi'nin sağlam parametre tasarımı, transfer fonksiyonlarını detaylandırmak için istatistiksel deneysel tasarım uygulayan ve tasarım optimizasyonu yapan sistematik bir metodolojidir [30-32]. Taguchi yöntemi, sağlam mühendislik tasarım prensiplerinin ve Taguchi'nin ortogonal dizi deneyi adı verilen deney tasarımı versiyonunun birleşimidir [30]. Bir Taguchi deneyinde, sadece ana etkiler ve iki faktörlü etkileşimler dikkate alınır [33,34]. Daha yüksek dereceli etkileşimlerin var olmadığı varsayılır. Ek olarak, deneyicilerden, konu hakkındaki bilgileri aracılığıyla, deneyi yürütmeden önce hangi etkileşimlerin önemli olabileceğini belirlemeleri istenir. Bu iki adımdan sonra, deneysel faktörlerin toplam serbestlik derecesi Taguchi deneysel tasarımında belirlenmelidir [30]. Serbestlik derecesi, incelenen tüm etkileri tahmin etmek için gereken göreceli veri miktarıdır. Taguchi deneyindeki optimizasyon, optimum yanıt veren faktör seviyesi kombinasyonunu bulmayı içerir. Optimum yanıt "en iyi" kriterinin ne olduğuna bağlıdır. Bu çalışmada QFD ile kritik tasarım parametreleri belirlendikten sonra Taguchi yöntemiyle belirlenen parametrelerin optimizasyon çalışmaları sanal ortamda yapılacaktır.



Şekil 1. DFSS aşamalarında kullanılan araçlar

Havacılık, uzay ve kara platformlarından gerçekleşen fonksiyonel yüklemeler sırasında ana yapıya bağlı komponent ve sistemlerin üzerinde atalet sebebiyle yüksek ivmeler ve bu doğrultuda yüksek yükler oluşabilmektedir. Bazen yükleme koşulları çok ve rezonans sebebiyle oluşan yüksek ivme değerleri ile karıştırılmakta fakat doğası gereği bu yüklemeler çok daha uzun süreler etkin olması sebebiyle çevresel testlerde sıklıkla kullanılmakta olan elektromekanik sarsıcılardan farklı test düzeneklerinde uygulanması gerekmektedir. Özellikle elektronik kutular üstünde şok ve titreşim testleriyle simüle edilemeyen uçuş ve yol yükleri sebebiyle oluşan ivmeler, lehimlerin, sensörlerin ve bağlantıların zarar görmesine, bazen kopmasına sebep olabilmektedir. Hava taşıtının yapısal çerçevesine yakın noktalara bağlanan parçalarda bile bağlama yönüne ve lokasyona bağlı olarak yüksek ivmeler ve yükler oluşmaktadır [35,36]. Askeri yapıların gereksinim doğrulamalarında kullanılan temel standartlardan biri olan MIL-STD-810-H'de servis yükleri sırasında oluşan yüksek ivmelere karşı yapısal dayanım, bağlantı kontrolleri ve fonksiyonel özelliklerde zayıflamayı test etmek amacıyla Metot 513 uygulanmaktadır [37]. Metot 513'de yapısal amaçlı yüksek ivmelerin testi için önerilen düzeneklerden biri santrifüj test düzeneğidir. Söz konusu test sisteminin maliyeti, yüksek güvenilirlik beklentisi ve uzun süreler çalışacak olması, tasarım ve üretim sürecinde klasik Faz Kapısı yönteminin kullanılmasının getireceği riskler açısından alternatif bir süreç ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu tip ileri mühendislik test sistemleri çözümleri, deneme ve yanılma dışında üst seviye mühendislik yaklaşımları ile yapılmalıdır. Test sisteminin geliştirilmesinde giriş bölümünde belirtilen avantajlar doğrultusunda DFSS uygulanmasına karar verildi. Literatür çalışması doğrultusunda projeye en büyük fayda sağlaması beklenen QFD, parametre diyagramı,

FMEA, DOE, ANOVA analizi, Taguchi optimizasyon yöntemi, Tasarım Doğrulama Planı kullanılmıştır. Çalışmada ortaya çıkan süre, maliyet ve güvenilirlik gibi kritik performans verileri klasik süreçle karşılaştırılarak uygulanan metodolojinin etkinliği gösterilmiştir.

2. DETERMINİSTİK TASARIM – FAZ GEÇİŞ METODU

Santrifüj test sistemi, çeşitli amaçlarla uzun yıllardır araştırmacıların üzerinde çalıştığı ve çözümler geliştirdiği bir yöntem olmuştur [38]. Endüstrinin farklı kollarında ve bilim alanlarında birbirinden bağımsız uygulamalara rastlanmaktadır. Santrifüj statik ivme test sistemi temelde merkezde dönen bir yapı ve bu yapıya bağlı döner kol ve bir model kutusundan oluşmaktadır [38,39]. Ürün geliştirme süreci başlangıçta Bias mühendislikte uygulanmakta olan Faz Geçiş metoduna dayalı tasarım prosedürü doğrultusunda kurgulanmıştır. Tasarım Süreci, 5 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; Ön Tasarım, Detay Tasarım, Test ve Doğrulama, Tasarım ve Geliştirme Değişikliklerinin Kontrolü ve Kabul aşamalarından oluşmaktadır. Oluşturulan Proje Beratında görev yetki ve sorumluluklar, tasarım ve geliştirme aşamaları, tasarım gözden geçirme taslakları, doğrulama ve validasyon taslakları, tasarım girdileri, işlevsel ve performans gereksinimleri, yasal gereklilikler, güvenlik gereksinimleri, maliyet hedefleri belirtilir. Bu çalışmada proje beratında yedi ay süre içinde, 5.05 adamxay ve toplam 47,520 € maliyetle projenin gerçekleştirileceği öngörülmüştür. Proje maliyet kalemleri Tablo-1'de gösterilmektedir.

Ön tasarım çalışmasına girdi olarak literatür ve rakip ürün araştırması yapılarak teknik istekler oluşturulur. Oluşturulan teknik istekler Tablo-2 de belirtilmektedir.

Tablo 1. Proje maliyet kalemleri

Gider Grubu	Maliyet, €
Proje Personel Maliyeti	23,200
Seyahat Giderleri Tahmini Maliyet	2,000
Alet/Teçhizat/Yazılım/Yayın Alımları Tahmini Maliyeti	3,000
Malzeme Alımları Tahmini Maliyeti	10,500
Üretim işçilikleri	4,500
Revizyonlar, %10 proje maliyeti	4,320
Toplam	47,520

Tablo 2. Teknik isterler

İster no	Tanımı
1	Test numunesi boyutu bağlantı fikstürü dahil 200x200x200 mm
2	Test numunesi ağırlığı 50 kg
3	Hedef ivmelenme 50 g
4	Hızlanma süresi en çok 5 dakika
5	Kaza durumunda çevresine zarar vermeyecek biçimde güvenlik önlemleri alınacaktır.
6	Kaza durumda operatör kararıyla veya yazılım aracılığıyla sistem mümkün olan en hızlı biçimde durdurulabilecektir.
7	Sistem bir yazılım aracılığıyla kullanılacak ve istenen ivme ve hızlara önceden belirlenen hız profilini takip ederek ulaşacaktır.

Ön Tasarım, belirlenen tüm isterleri karşıladığı görüldükten sonra; Ön Tasarım gözden geçirme toplantısı düzenlenir. Herhangi bir revizyon kararı ya da proje iptali kararı çıkmaz ise tasarım onayı alınmış olur ve Detay Tasarım aşamasına geçilir. Bu aşamada sistem analiz ve hesaplamalarının uygun olduğu ve amaçlanan tasarım gerekliliklerinin sağlanabildiğinden emin olmak için tasarım için gerekli kontrollerin yapılması gerekir. Proje zaman planı Şekil-2 de gösterilmiştir.

Üretilen prototipin ölçü kontrol raporlarının proje birimi tarafından uygunluğu kontrol edilir. Yapılan kontroller sonucunda uygunsuz olan sonuçlar var ise kavramsal prototip üretimi tekrarlanır. Yapılan tasarım revizyonu gerekliliği değerlendirmesi sonucunda gerekiyor ise prototip tasarımı tekrar yapılır. Organize edilen Detay Tasarım (CDR) Gözden Geçirme aşaması sonrası üretim yapılır. Test ve Doğrulama aşamasında, başarısızlıklar olması durumunda prototip üretim, detay tasarım veya ön tasarım aşamalarına geri dönülür ve üründeki iyileştirmeler tamamlanır. Test Sonuç Gözden Geçirme aşaması sonucunda onay alan ürün ile ilgili kabul aşamasına geçilir. Kullanıcı ve sahadan gelen geri beslemeler doğrultusunda değişiklik talepleri, tasarım ekibi tarafından değerlendirilir.

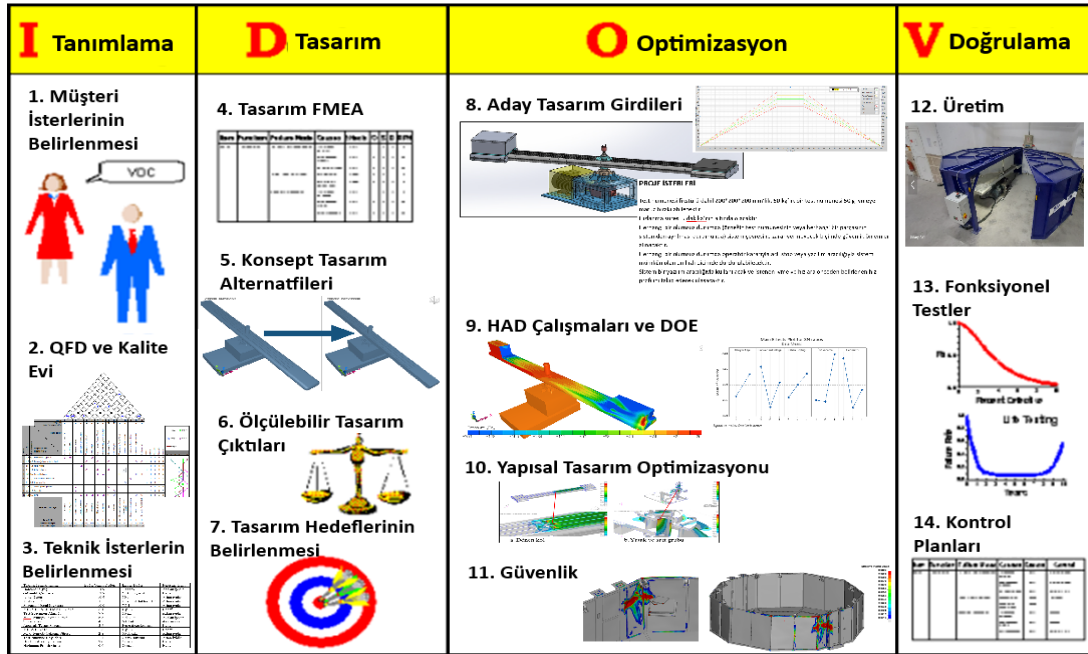
3. DFSS METODU

Mevcut Faz Geçişli deterministik tasarım sürecine alternatif olarak kullanılan DFSS yöntemi

ile ilk seferde doğru ürünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda isterlerin belirlenmesi amacıyla müşteri anketleri, uzman görüşmeleri, rakip incelemeleri çalışmaları ile başlamıştır. Sonrasında yapılan QFD analizi ile isterler tasarım parametrelerine (DP) dönüştürülmüştür. Kavramsal tasarım aşamasında DFMEA ve sonlu elemanlar analizlerinden faydalanarak konsept tasarımı oluşturacak bilgiler toplanmıştır. Optimizasyon aşamasında kritik özellikler için deney tasarımı çalışması, Taguchi sağlam parametre tasarımı, iterasyonlar kullanarak hedef değerlerin sağlanması hedeflenmiştir. Son aşamada doğrulama planında belirlenen aksiyonlar gerçekleştirilerek ürün devreye alınmıştır. Tüm çalışma sürecinde kullanılan metodoloji ve adımlar Şekil-3’de özetlenmiştir. Proje başında kurgulanan Faz Geçişli deterministik tasarım yöntemiyle karşılaştırıldığında süreçler arasında benzerlikler olmakla beraber, klasik sistemde aşamaların geçişlerinde belirgin bir sayısal sistematik kullanılmadığı, kararların tamamen tecrübeye bırakıldığını görmekteyiz. Dolayısıyla iyileştirme çalışmalarının ne seviyede yapılacağı, karar stratejileri klasik ürün geliştirme süreçlerinde uygula, test et, düzelt, iyileştir döngüsüyle yürümektedir. Her bir aşamanın sonunda ekip kararıyla başa dönelebilmekte ve ciddi süre kayıpları oluşabilmektedir. Daha tehlikelisi, bir sonraki aşamaya ciddi riskler taşınabilmektedir. Oysa başarılı bir ürün geliştirme sürecinde kullanılan doğru araçlar ile nihai doğrulama aşamasının temel amacı iyileştirmeler için veri oluşturmak değil, ürün kabulünün tamamlanmasıdır.

		1. Ay	2. Ay	3. Ay	4. Ay	5. Ay	6. Ay	7. Ay
Ön Tasarım	Sistem Gereksinimleri Gözden Geçirilmesi							
	Benchmark Analizi							
	Görev Profili Tespiti							
	Proje Yönetim Planı Oluşturulması							
	Sistem İsterleri Gözden Geçirme Toplantısı							
Detay Tasarım	Mevcut motor ile kapasite belirlenmesi							
	Redüktör seçimi							
	Mil-yatak grubu kavramsal tasarımı							
	Kanat grubu kavramsal tasarımı							
	Kaide kavramsal tasarımı							
	Kavramsal tasarım gözden geçirme toplantısı							
	Akış-modal-yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi							
	Mil-yatak grubu detay tasarımı							
	Kanat grubu detay tasarımı							
	Ölü ağırlık detay tasarımları							
Üretim - Mekanik	Siparişlerin verilmesi							
	Ürün kalite kontrolleri							
	Üretim - montaj faaliyetleri							
Üretim - Yazılım	Eğitim							
	Arayüz tasarımı							
	Veri toplama katmanı yazılımı							
	Yazılım doğrulama faaliyetleri							
Üretim - Kontrol sistemi	Sürücü pano gözden geçirilmesi							
	Akım koruma ekipmanı gerekliliği entegrasyonu							
	Sürücü parametrelerinin ayarlanması							
	Acil stop devresi tasarımı ve entegrasyonu							
	Frenleme direnci entegrasyonu							
	Kontrolcü - Encoder entegrasyonu ve hız okuma							
	kablo belirlenmesi ve kablolama							
Test Doğrulama	Kademeli yüklü/yüksüz denemeler							
	Dummy numune ile testler							
	Revizyonlar ve Kabul							

Şekil 2. Faz Geçiş yöntemiyle oluşturulan ürün geliştirme zaman planı



Şekil 3. Santrifüj test platformu geliştirilmesinde kullanılan DFSS aşamaları ve araçları

4. TANIMLAMA AŞAMASI – QFD

Mevcut ürün geliştirme sürecinde isterler, rakip ürün incelemeleri, literatür araştırmaları ve tasarım ekibinin tecrübeleri ile oluşturulmaktadır. Bu doğrultuda Tablo-2’de santrifüj ivme test sistemi için

yedi adet ister belirlenmiştir. DFSS yönteminde en çok üstünde durulan aşama, tanımlama aşamasıdır. Proje ekibinin bu aşamada harcayacağı emek ve etkili araçların kullanılması sonraki aşamalara ürün ile ilgili hata ve risklerin taşınmasını engelleyecektir. Ürünün müşterinin sesini yansıtması temel amaçtır.

QFD uygulaması DFSS prosesi içinde en önemli aşamalardan biri olup, tam uygulanması durumunda birbirlerine bağlı dört ayrı çalışmadan oluşur [5]. Belirtilen dört QFD çalışması sadece tanımlama aşaması değil, daha sonraki tasarım ve optimizasyon aşamalarının da önemli bir aracıdır (Şekil-4). Birinci çalışma, Kalite Evi (House of Quality -HOQ) olarak adlandırılır ve genellikle QFD' ye atıfta bulunmak için kullanılır. Ancak bu ilk matrisin kendisi tek başına tam uygulamayı oluşturmaz. HOQ müşteri gereksinimlerini alır ve bunları teknik (tasarım) gereksinimlere dönüştürür. HOQ, müşterinin sesini yakaladığı ve bir yol oluşturduğundan dolayı, geliştirme sürecindeki en kritik unsurdur ve en sık kullanılan QFD bileşenidir. Aşağıda belirtilen her bir adım, HOQ oluşturulurken tamamlandığı sıraya göre adlandırılmıştır. İkinci matris teknik gereksinimleri parça özelliklerine dönüştürür ve bunlar daha sonra üçüncü matriste süreç gereksinimleri açısından ifade edilir. Son matriste ise gereksinimler üretim parametrelerine dönüştürülerek QFD çalışması tamamlanır [5].

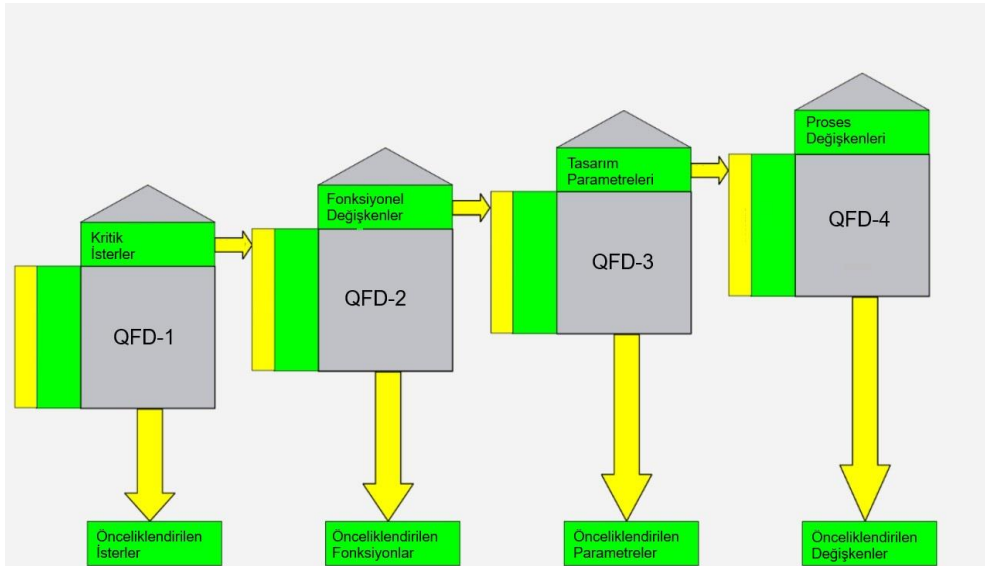
Kalite evi oluşturulurken, birinci adım, müşteri ihtiyaçlarını tanımlanması ve önem derecelerini belirlenmesi çalışmasıdır. Müşteri ihtiyaçları (gereksinimleri) genellikle anketler, görüşmeler, odak grupları ve diğer benzer yöntemlerle toplanır. Müşteri ihtiyaçları önem derecesine göre birkaç seviyede tanımlanabilir ve tanımlanan seviyeler ihtiyaç hakkında ayrıntılı bilgi sağlayabilir. Santrifüj statik ivme test makinaları, özellikle elektronik ekipman sektörüne hizmet veren test merkezleri tarafından kullanılmaktadır. Söz

konusu ürünün yurtdışı teminini yapılmakla birlikte yerli imkanlarla üretim olmadığı için, müşterinin sesi çalışmaları kurulu sistemlerin kullanıcılarından alınan bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Havacılık, Uzay Sanayi ve Savunma sanayi firmalarında kendi kullanımları için satın alınan veya modifiye edilmiş test sistemleri bulunmaktadır [40]. Bu ürünlerle ilgili kullanıcı görüşleri alınarak QFD çalışması başlatılmıştır. Buna ilave olarak ürünün potansiyel kullanıcısı olabilecek orta ve büyük ölçekli test merkezlerinin yöneticileri ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Elektronik ekipman üreticilerinden test ihtiyaçları toplanarak, pazardaki ihtiyaçlar belirlenmiştir. Ayrıca internet üzerinden rakip ürünlerin özellikleri mühendislik ekibince önem derecesine göre sıralanmıştır. Kullanıcılardan, test yöneticilerinden ve rakip analizlerinden gelen veriler belirlenen ağırlık seviyeleri ile çarpılarak en önemli özelliğe “9” verecek şekilde, önem derecesi olarak kalite evine yerleştirilmiştir. Önem derecesi hesaplamasında “Kullanıcılar K_i ”, “Test Firmaları TF_i ”, “Rakipler R_i ” için derecelendirme hesabında 1,2 ve 3 numaralı denklemler kullanılmıştır.

$$K_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^m K_i} \quad (1)$$

$$TF_i = \frac{TF_i}{\sum_{i=1}^m TF_i} \quad (2)$$

$$R_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^m R_i} \quad (3)$$



Şekil 4. Kalite Fonksiyon Dağıtımı (QFD) aşamaları

QFD çalışmasında kullanılacak önem derecesi hesaplamasında her bir veri türü ağırlıklandırılarak, toplam önem derecesi hesaplamasında 4 numaralı denklem kullanılmıştır.

$$OD_i = 0.6 \times K_i + 0.3 \times TF_i + 0.1 \times R_i \quad (4)$$

Her bir müşteri önem derecesi, Kullanıcılar, Test Firmaları ve Rakip analizindeki uzman görüşlerinden oluşmaktadır. Bu değerler en önemli bileşen kullanıcılardan gelmektedir.

İkinci adımda, teknik gereksinimler tanımlanır, karşılaştırmalı ilişkileri belirlenir. Müşteri ihtiyaçlarını hesaplanan önem derecelerine göre listeledikten sonra, teknik gereksinimler oluşturuldu. Müşteri ihtiyaçları, müşterinin dilinden ifade edilmesi genelde tercih edilir. Teknik gereksinimleri oluşturmaktaki amaç, bu ihtiyaçların ölçülebilir niteliklerle ifade edilen tasarım gereksinimlerine çevrilmesidir. Her bir teknik gereksinim bir veya daha fazla müşteri ihtiyacını değişen önem derecelerine göre karşılayabilir. HOQ çatısı, teknik gereksinimler arasındaki korelasyonu göstermek için kullanılır. Hangi teknik gereksinimlerin birbirini desteklediğini veya birbirine karşı çalıştığını belirlemek önemlidir. Bu adımda ayrıca teknik gereksinimler için iyileştirme yönünün (maksimum, minimum veya hedef değere ulaşma) belirlenmesi de yer alır. Bu bilgiler çatı ile teknik gereksinimleri listeleyen satır arasındaki bir satırda saklanır. Şekil-4 de yeşil renk ile belirtilen sol dikey sütunda listelenen müşteri ihtiyaçları (Şekil-5 müşteri istekleri), ilişki matrisi adı verilen bölümü doldurarak en üstte yeşil renkte yatay satırda listelenen teknik gereksinimlere bağlanır (Şekil-5 teknik istekler). QFD çalışması görselliği yoğun bir metodoloji kullanmaktadır, sembollerle müşteri ile teknik gereksinimler arasındaki ilişkiler tanımlanır. Müşteri gereksinimlerinden biriyle güçlü bir ilişkisi olan en

az bir teknik gereksinim olması gerekir. Bunun olmaması, belirli bir müşteri gereksiniminin önemli ölçüde karşılanamayacağını gösterir. Benzer şekilde, bir teknik gereksinim müşteri gereksinimlerinden herhangi biriyle güçlü bir şekilde bağlantılı değilse, bu gereksinim QFD analizine dahil edilmemelidir.

Dördüncü adımda rekabet analizi gerçekleştirilir. Rakiplerin ürün veya hizmetleri, matrisin en sol sütununda gösterilen müşterilerinin sesini karşılamadaki performansları açısından incelenir. Her rakip ürünü değerlendirmede, 5'in en iyi temsil ettiği 1 ile 5 arası bir ölçek kullanılmıştır. Rakip analizlerinde firmaların internet sitelerinden faydalanılmıştır. Beşinci adımda, rekabet analizinin sonuçlarını ve müşteri ihtiyaçları için önem derecelerini kullanarak, teknik gereksinimler için hedef değerlerin seçilmesi aşamadır. Rakiplerin daha iyi performans gösterdiği ihtiyaçlara karşı gelen gereksinimler ve daha yüksek önem derecesine sahip olanlar vurgulanır. Daha sonra, her teknik gereksinim için seçilen hedef değerlere ulaşmanın ne kadar zor olduğuna göre teknik zorluklar belirlenir. Sıralamalar genellikle 1'in en kolay, 5'in en zor olduğu beş puanlık bir ölçek kullanılarak yapılır. Bazı QFD uygulamalarında, bu adımda ayrıca teknik gereksinimler açısından rakip değerlendirmesini de içerir ve sonuçlar önem derecelendirmelerinden önce matrisin bodrumunda yer alan bir satıra kaydedilir. Son bölümde, önem derecelendirmelerinin kaydedildiği evin bodrumu tamamlanır (Şekil-5, hedef ve limit değerler). Önem derecelendirmeleri, QFD sürecinin sonraki adımlarında hangi teknik gereksinimlerin en fazla dikkati çekeceğini belirlemek için hesaplanır. Önem derecelendirmeleri, her bir öğenin müşteri ihtiyaçlarını karşılama açısından ağırlığına göre her bir teknik gereksinimin göreceli önemidir.

Tablo 3. Müşteri istekleri

#	Müşteri İsteri	K	TF	R	OD
1	Standartlara uygunluk	9	9	9	9.0
2	Farklı ağırlıkları test edebilmeli	6	7	5	6.2
3	Kolay montaj	5	5	5	4.5
4	Kolay hızlanma	4	3	4	3.7
5	Güvenli kullanım	7	6	5	6.5
6	Hızlanma tarif edilebilmeli	1	1	1	1.0
7	Uyarı vermeli	3	4	1	3.1
8	Düşük işletme giderleri	8	8	7	7.9
9	Sessizlik	2	2	5	2.2
10	Fiyat	7	8	3	6.9

Tablo 4. QFD’de kullanılan semboller

Sembol	Tanım	Sayısal Değer
⊖	Güçlü İlişki	9
○	Orta ilişki	3
▲	Zayıf ilişki	1
++	Güçlü pozitif korelasyon	
+	Pozitif korelasyon	
-	Negatif korelasyon	
▼	Güçlü negatif korelasyon	
▼	İyileşme yönü negatif – amaç azaltmak	
▲	İyileşme yönü pozitif – amaç arttırmak	
X	Amaç hedef değere ulaşmak	

Her bir teknik gereksinimin mutlak önemi, aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır:

$$W_j = \sum_{i=1}^n d_i r_{ij} \quad (5)$$

Burada W_j , j ’inci teknik gereksinimin ağırlığı, d_i , i ’inci müşteri gereksiniminin önem derecesi ve r_{ij} i ’inci müşteri gereksinimi ile j ’inci teknik gereksinim arasındaki ilişki katsayısıdır ve HOQ grafiğindeki “ilişki matrisinden” çıkarılır. Daha sonra, bağıl önem değeri aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir

$$Z_j = \frac{W_j}{\sum_{k=1}^m W_k} \quad (6)$$

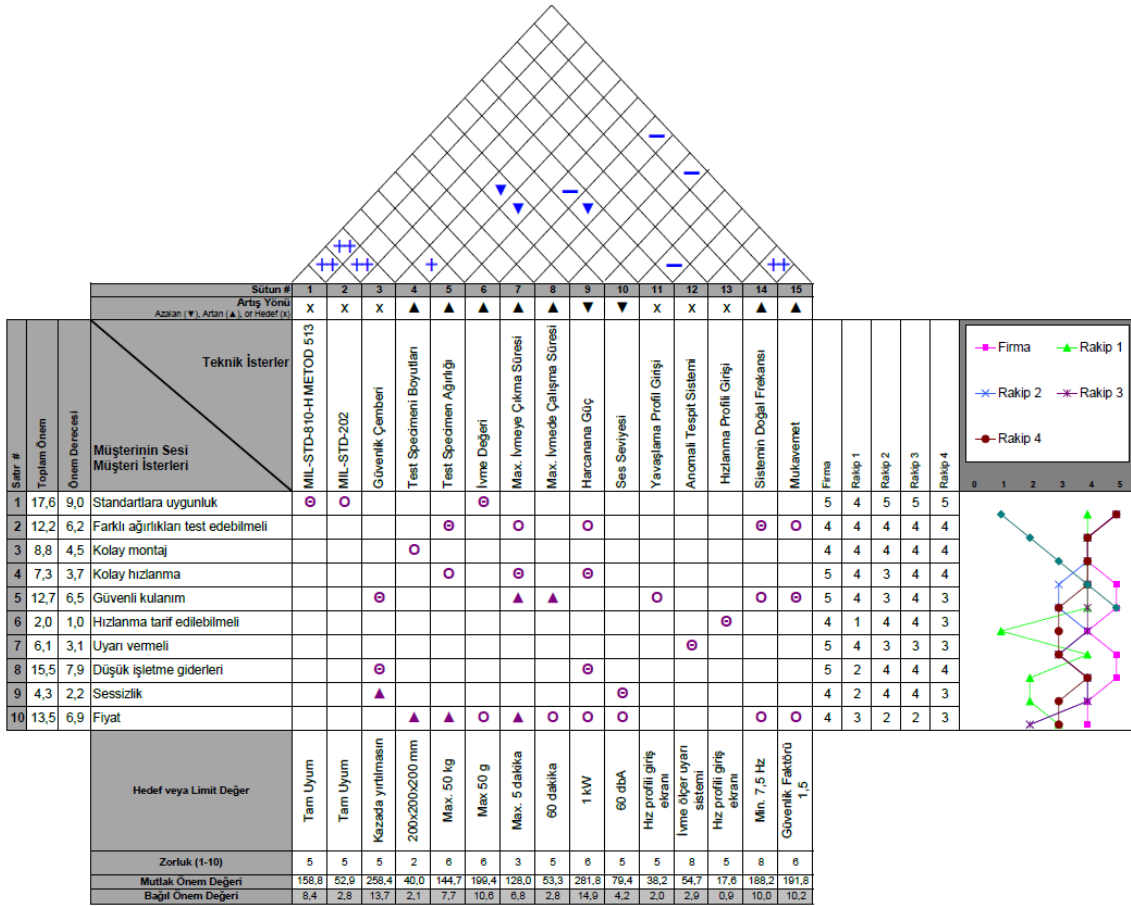
Burada Z_j , j ’inci teknik gereksinimin bağıl ağırlığıdır (önem derecesi). Rakip ürünlere kıyasla daha yüksek önem derecesine ve düşük performansa sahip teknik gereksinimler, yukarıda açıklanan aynı işlem kullanılarak parça özelliklerinin belirlendiği başka bir matrisin oluşturulduğu ikinci aşamaya taşınır. Bu durumda teknik gereksinimler, yeni matrisin sol sütununa girilir. Bu işlem, QFD uygulamasındaki son matris tamamlanana kadar devam eder. Biz bu makalede ürün seri üretim ve özel prosesler içermediği için kalite evi seviyesinde QFD çalışmasını bitireceğiz. Bağıl ağırlıklara bakınca kullanıcı açısından en dikkat çeken teknik özelliğin elektrik motorunun çektiği yük olduğunu görmekteyiz (14.9), sonrasında güvenli çalışma (13.7) maksimum test ivmesi (10.7), sistemin doğal frekansı (10), ve mukavemeti (10.2) önemli çıkmaktadır. Elektronik ekipmanların yüksek ivme yükleri altında fonksiyon ve dayanımı ile ilgili MIL-STD-810-F, MIL-STD-202 ve IEC68-2-7 numaralı test standartları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı rakiplerin bu standartlardan biri ve birkaçını kapsayabildikleri görülmekle birlikte üçünü birden içeriyor olmanın müşteri açısından önemli bir kriter olduğu görülmüştür. Üzerinde çalışılacak test platformunun çalışma aralığı, maksimum ivme

seviyesi, tolerans aralıkları gibi ana isterlerin oluşturulmasında QFD çalışması kullanılmıştır. Bu doğrultuda test numunesinin bağlantı fişstürü dahil 200x200x200 mm boyutlarında, 50 kg’lık ağırlığı 50 g ivmeye kadar çıkarması hedeflenmiştir.

Düzenegin maksimum ivmeye gelene kadar geçen hızlanma süresi 5 dakikanın altında olacaktır. Çıkan ivme değerlerini sağlayacak dönme hızlarının yüksek olması sebebiyle herhangi bir olumsuzluk durumunda (örneğin test numunesinin veya herhangi bir parçasının sistemden ayrılması durumunda) sistem çevresine zarar vermeyecek biçimde güvenlik önlemleri alınmalıdır. Böyle bir durumda operatör kararıyla acil stop düğmesine basılsa dahi güvenli durma yazılım aracılığıyla belirlenen bir yavaşlama profili ile durdurulabilecektir. Sistem, maksimum ivme değerine ulaştıktan sonra sürekli çalışma süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süre içinde sistemdeki ivme değişimi, güç dalgalanması minimum seviyede tutulmalı ve herhangi bir anomali davranışı sistem tarafından tespit edilip kayıt altına alınmalıdır.

QFD çalışmasının birinci aşaması olan HOQ Şekil-5’de gösterilmektedir. Teknik özellikler çıkan bağıl önem değerine göre Tablo-5’de özetlenmiştir. Tablo-5’de belirtilen ilk beş teknik ister ile ilgili optimizasyon çalışmaları optimizasyon aşamasında detaylı olarak incelenmiştir.

Mevcut ürün geliştirme sürecinde kıyaslama literatür çalışmaları ile yedi tane ister belirlenmiştir. Bu isterlerin önem sırası ise proje ekibinin tecrübe ve inisiyatifleriyle oluşturulmuştur. DFSS de kullanılan anket ve QFD çalışması doğrultusunda ürüne doğrudan etki eden on beş adet teknik ister oluşturulmuş vebu isterler sayısal metriklerle önem sırasına göre derecelendirilmiştir. Klasik yöntemle test sırasında elektrik motorunun harcadığı güç ve güvenlik çemberi proje ekibinin ister listesinde olmamasına rağmen, QFD çalışmasında en önemli isterler olduğu görülerek, tasarım ve optimizasyon aşamalarında bu iki ister üzerine odaklanıldı.



Şekil 5. Santrifüj test platformu için düzenlemiş kalite evi

Tablo 5. Teknik isterlere ait bağıl önem ve hedef değerleri

Teknik özellik tanımı	Bağıl Önem Değeri	Hedef Değer	İyileşme Yönü
Harcanan güç	14.9	1000 W	Azalan iyidir
Güvenlik Çemberi	13.7	Yırtılmayacak	Hedef
İvme Değeri	10.6	50 g	Artan iyidir
Mukavemet	10.2	Güvenlik faktörü 1.5	Artan iyidir
Sistemin Doğal Frekansı	10.0	7.5 Hz	Artan iyidir
MIL-STD-810-H METOD 513	8.4	Uyum	Hedef
Test Numune Ağırlığı	7.7	50 kg	Artan iyidir
Max. İvmeye Çıkma Süresi	6.8	5 dakika	Azalan iyidir
Ses seviyesi	4.2	60 dbA	Azalan iyidir
Anomali Tespit Sistemi	2.9	İvme ölçer kullanımı	Hedef
MIL-STD-202	2.8	Uyum	Hedef
Max. İvmeye Çalışma Süresi	2.8	60 dakika	Artan iyidir
Test Numune Boyutları	2.1	200x200x200	Artan iyidir
Hız Profili Giriş Ekranı	2.0	Olması	Hedef
Hızlanma Profili Girişi	0.9	Olması	Hedef

5. KONSEPT VE TASARIM AŞAMASI

Mevcut tasarım sürecinde isterleri yansıtan konsept bir tasarım üstünde çalışılarak bir katı model ve komponent listesi hazırlanır. Ekibin temel hedefi oluşturulan konsept tasarımın proje başında belirlenen hedefleri eksiksiz içermesidir. Bu aşamada test sistemini oluşturan motorun gücü, kanat boyları,

yatakları oluşturan elemanların tipleri ve yaklaşık ürün maliyeti konsept tasarımı oluşturmaktadır. Şekil-6'da klasik ürün geliştirme süreci sonunda konsept çalışmasının sonuçları gösterilmektedir. Bu aşamada ürün ve proje ile ilgili riskler ile ilgili öngörüler sınırlıdır. İleri seviye mühendislik analizlerine duyulan ihtiyaç daha çok detay tasarım aşamasında ortaya çıkacaktır.

STATİK İVME TEST SİSTEMİ MALZEME LİSTESİ			
No	İsim	Açıklama	ADET
KANAT GURUBU PARÇA/MALZEME			
1	Kanat plaka altı	400x400x20 6061 alaşım	2
2	sigma profil	90x180x3000 T10 ağır 3 m 0.05 tol	1
3	sigma profil	90x180x400 T10 hafif 0.4 m 0.05 mm tol	4
4	sigma profil bombeli	Kenar çita 45x45	16
5	Kanat dış kapak	Alüminyum plaka 6 mm	2
6	çetvel	400 mm	2
RULMAN ARA YATAK - MİL GURUBU PARÇA/MALZEME			
7	Rulman (kendinden yataklı)	UCF 212	2
8	enkoder bağ braket	ST 37 sac imalat	1
8	enkoder/braket bağ civata	M3x10 imbus kalite 8/8	3
9	enkoder barketi /redüktör bağ civata	M10x20 imbus kalite: 8/9	2
RULMAN ARA YATAK PARÇA/MALZEME			
10	Rulman ara yatak üst parça	ST 37 çelik	1
11	Rulman ara yatak silindirik parça	ST 37 çelik	1
12	Rulman ara yatak bayrak parça	ST 37 çelik	8
13	Rulman ara yatak alt tabla 500x540x	ST 37 çelik	1
ANA KAİDE GURUBU PARÇA/MALZEME			
14	Ana kaide zemin plaka 1000x600x20	St 37 kalite	1
15	Redüktör braket	St 37 sac	1
16	Şase	60x60x2.5 çelik profil ST 52	6
17	motor altı burç	Sae 1040 40x13x18	4
18	motor muhafaza sacı	ST 37 kalite	1
MOTOR - REDÜKTÖR GRUBU			
19	Elektrik motoru	Volt VM 132S-2	1
20	Redüktör	YILMAZ REDÜKTÖR KT_27_3_0_T00_ML17A_M5	1
21	Enkoder	ATEK ARS S 050	1
22	Slip Ring	ZEN-X3 12	1
23	Slip Ring Motor kaplini	BK 38	1
GÜVENLİK DUVARI / DUMMY PARÇALAR/ASKI MUYLUSU			
24	Balans Askı Mıylusu	Kanat grubunun balansına bakmak için dairese parç	1
25	Dummy ağız yükü kutusu		1
ELEKTRİK PANO/KONTROL CÜ			
26	Sürücü	Delta VFD-055 E23A	1
27	Elektrik pano ve sarf malzeme		1
28	Fren Direnci		1
29	Beckhoff Otomasyon kiti	t 1 kanal analog çıkış terminali 0-10V	1
30	Beckhoff ivme ölçer modülü	2-channel analog input, 16 bit, 50 ksp/s	1
31	İvme Ölçer		1
32	IP Kamera		1
33	Ethernet switch		1

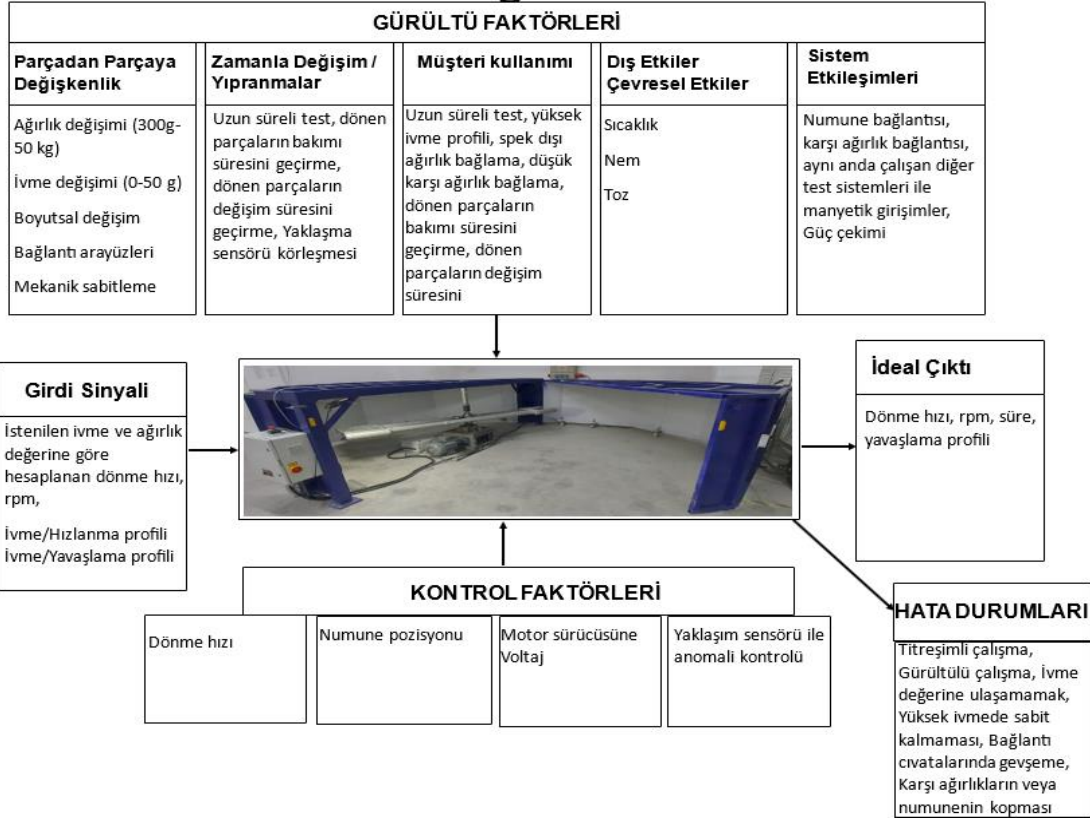
Şekil 6. Ön tasarım sonucu oluşan malzeme listesi

DFSS sürecindeki ikinci aşama kavramsal tasarım ve karakterizasyonunu içerir [5,41]. Müşteri gereksinimlerini ürün/süreç fonksiyonel gereksinimlerine çevirdikten sonra, müşteriyi neyin tatmin edeceği hakkında elde edilen veriler doğrudan tasarım gereksinimleri olarak kullanılamaz. Birinci aşamada yapılan QFD çalışması ile bu dönüşüm tamamlanır. Yeni tasarım konsepti (ürün, hizmet veya süreç) için fonksiyonel gereksinimlerin belirlenmesinden sonra, bu fonksiyonel gereksinimleri karşılayabilecek tasarım parametrelerini karakterize etmemiz (geliştirmemiz) gerekir. Aksiyomatik tasarım ve TRIZ (Yaratıcı Tasarım Yöntemi) yenilikçi tasarımların uygulanmasında sıklıkla başvuru metotlarıdır. Bu çalışmada ürün sektöründe bilinen bir uygulamanın tekrardan gerçekleştirilmesi olduğu için yenilikçi tasarım yöntemlerine ihtiyaç duyulmamıştır. Oluşturulan birkaç tasarım alternatifini değerlendirmemiz ve hangi konseptin kullanılacağına dair nihai bir karar vermemiz gerekir. Tasarım değerlendirmesinde kırılgenlik analizi [5] ve FMEA dahil olmak üzere birçok yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada DFMEA, sonlu elemanlar analizleri tasarım araçları olarak kullanılmıştır [27]. Tasarım FMEA'nın amacı, ekibin Altı Sigma kalite seviyesi için tasarım yapmasına yardımcı olmaktır. DFMEA nadiren yapıldığından veya bir formalite olarak görüldüğünden uygulanması bir süreç değişimidir ve tasarımın güvenilirliğini önemli ölçüde artıracaktır.

DFMEA'nın en büyük kaldırıcısı, arıza modlarının proje henüz kâğıt üzerindeyken erken aşamalarında proaktif olarak belirlenmesidir.

Arıza modları, yapıdaki her hiyerarşik varlığın amaçlanan ömrünün sonundan önce nasıl arızalanabileceğini açıklar. Çalışmada p-diyagramından ve QFD den faydalanarak tasarım parametrelerinin (Design Parameter- DP) aksiyom ihlali nedeniyle tasarım zayıflığı, gürültü faktörleri, etkileri ve bunların DP'lerle etkileşimini DFMEA'nın girdisini oluşturmuştur. Detaylı p-diyagram Şekil-7'de verilmektedir. Ayrıca p-diyagramında birimler arası üretim ve montaj zayıflıkları, montaj hataları, malzeme çeşitliliği dikkate alınmıştır. Olası arıza nedenleri, hata ağacı analizi (Failure Tree Analysis-FTA), neden-sonuç diyagramı ve neden-sonuç matrisi gibi araçlarla analiz edilebilir. Her arıza modu, sonuçların ciddiyeti, tespiti ve nedenlerinin ortaya çıkması açısından ele alınmıştır. DFMEA çalışması oldukça detaylı ve uzun bir çalışma olduğundan bu maktelede tamamına yer vermek yerine ana fonksiyonlardaki kritik olabilecek unsurları özetlenmiştir. Özet DFMEA Tablo-6'da verilmiştir. Ekip, RPN numaralarına dayanarak düzeltici eylemlere karar vermek üzere harekete geçerek aksiyonları belirledi. Söz konusu aksiyonlar gerek yapılacak sonlu elemanlar analizlerinde gerekse daha sonradan oluşturulacak tasarım doğrulama planında (Design Verification Plan – DVP) kullanılacaktır.

P-Diagram



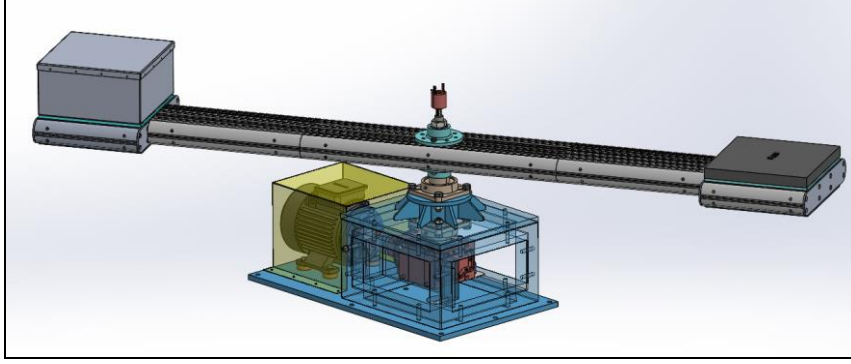
Şekil 7. Santrifüj test sistemi için oluşturulan parametre diyagramı

Tablo 6. Tasarım Hata Modu Etki Analizi

ID	Sistem veya Komponent	Fonksiyon	Potansiyel Hata Modu	Hatanın Olası Etkisi	Sıklık	Nedeni	Olasılık	Mevcut Kontroller	Bulma	RPN	Önerilen Aksiyon	Sıklık	Olasılık	Bulma	RPN
#								Ölçüm							
1	Kanat grubu	Dönerek ivme oluşturma	Kanadın kırılması	Koparak tehlike oluşturma	9	Malzeme mukavemet zayıflığı	2		3	54	Penetrasyon analizi ile kapama sac kalınlığı belirlenmesi	6	2	2	24
2					9	Cıvataların kopması	3	Rakip analizi	4	108	Cıvata kopma analizleri	9	3	2	54
3			Cıvata gevşeme	Titreşimli çalışma	7	Cıvataların gevşemesi	4	Yok	8	224	Kontrol kartlarına uygun cıvata torqlarının girilmesi	7	4	2	56
4			Titreşimli çalışma	Erken ayırmalar	8	Doğal frekans etkisi	5	FE analizleri	2	80	Yaklaşma sensörü ile anomali kontrolü	8	4	1	32
5	Rulma - Ara yatak - Mil grubu	Motorun gelen torkun kanada iletilmesi	Yıpranma	Titreşimli çalışma	7	Hatalı montaj	4	Tolerans kontrolü	3	84					0
6	Taşıyıcı grup	Kanat ve motoru taşıma, yapsal bütünlük sağlama	Kırılma, çatlak	Koparak tehlike oluşturma	9	Malzeme mukavemet zayıflığı	3	FE analizleri	2	54					0
7	Motor - Redüktör grubu	Kanatlara tork vererek hareket sağlama	Hızlanmama	İvme değerini sağlamama	8	Seçilen motor gücü	4	El hesabı	4	128	CFD analizleri ile güç ihtiyacı belirlenmesi	8	4	2	64
8			Sürekli çalışmama	Testin yapılamaması	8	Seçilen motor kapasitesi	4	El hesabı	4	128	Deney tasarımı ile güç azaltma	8	4	2	64
9	Güvenlik Duvarı	Kopan parçaların tutulması	Delinme	Hayati risk	9	Düşük duvar kalınlığı	4	Tecrübe	5	180	Penetrasyon analizleri ile kalınlık belirlenmesi	9	4	2	72
10	Elektrik panosu ve kontrolcü	Test sırasında stabilite	Yavaş hızlanma	Standartta uyumsuzluk	8	Kontrolcü parametreleri	3	Tecrübe	3	72	Deney tasarımı	8	3	2	48
11			Acil stop	Kopma	9	Kontrolcü parametreleri	3	Özel duruş algoritması eklenmesi	1	27					0

Kavramsal tasarım, bir kol üzerinde orta bölgeden merkezlenip test edilecek ürün bir uca, karşı ağırlığın diğer uca yerleştirilecek şekilde bir yatak etrafında kolun dönmesinden oluşmaktadır. Dönme mekanizması, yanal ve eksenel yükleri karşılamak

amacıyla bilyeli yatak içine sabitlenmiştir. Elektrik motorunda üretilen güç, bir redüktör yardımı ile tahriki 90 derece döndürerek dönen kola aktarmaktadır. Test platformunun genel yapısı Şekil-8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Santrifüj test platformu kavramsal tasarımı

Tasarım olgunlaşma sürecinde QFD çalışması sonucunda önem olarak en yüksek değere sahip olan elektrik motorunun çektiği yük (15.1), maksimum test ivmesi (10.7), sistemin doğal frekansı (10.1), mukavemetin (10.3) birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Öncelikle yataklar ve rulmanlar üstünde fazladan ataletsel yükler oluşturulmaması için dönen kolların ağırlığı ve atalet momenti mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Belirtilen amaç gerçekleştirilirken yapının modal davranış problemleri ve yüksek hızlarda kanat çırpma gibi yapısal değişkenlikler göstermesi, titreşim, ses ve yatak aşınma problemlerine sebep olacağı için dikkatli değerlendirilmelidir. Maksimum test yükünde kollarda esneme değerinin minimumda tutulması için eğme yüklerine dirençli bir kesit geliştirilmesi gerekmektedir. Test parçası, karşı ağırlık, dönme platformu, motor ve diğer bağlantıların yapısal dayanım açısından kontrolü ve yüksek güvenilirlikte olması, test sırasında oluşabilecek bir sorunda, hayati risklerin ortadan kaldırılması ve sistemin tamamen güvenli olması, test platformunun ve test numunesinin korunmasını birincil öncelik olarak tasarım kriterlerine eklenmesini gerektirmektedir. Özetle bir taraftan hafif bir sistem geliştirilmesi diğer taraftan yapısal birliktelik adına yüksek güvenlik katsayıları oluşturulmalıdır.

Konsept tasarım aşamasında parametre diyagramı ve tasarım FMEA araçları kullanılarak, özellikle ürünle ilgili bazı riskler ortadan kaldırılarak optimizasyon aşamasında odaklanılacak ürün fonksiyonları belirlendi. Tasarım risklerine alternatif çözümler geliştirilerek risklerin hangi oranda iyileştirildiği, sayısal değerler ile belirlendi. Ön plana çıkan sekiz farklı tasarımsal risk faktöründe %50 civarında iyileşmeler sağlandı ve bazı güvenlik riskleri ilave tasarım çözümleri ile ortadan kaldırıldı.

6. OPTİMİZASYON AŞAMASI

Genellikle klasik ürün geliştirme süreçlerinde iyileştirme çalışmaları deterministik yaklaşımlarla

gerçekleştirilir. Örneğin, yapısal dayanım çalışmasında ürünü etkileyen boyutsal veya malzeme özellikleri belirli değerlerin altında kalacak şekilde tasarım kontrolleri yapılır. Maksimum yükte gerilme değerinin belli bir güvenlik faktörü ile malzeme akma değerinin altında kalması veya uzun yapısal ömür için kopma değerinin %50 sinin altında kalması gibi. DFSS de hedeflenen optimizasyon çalışması bir veya birçok fonksiyon için o fonksiyonlara etki eden tüm tasarım parametrelerinin bulunmasını ve optimize edilmesini içerir. Bu ancak istatistikî analiz yöntemleri ile yapılabilir. Klasik ürün geliştirme prosesinde santrifüj test sistemi sadece yapısal dayanım açısından ele alınmış ve geometri ve kullanılan malzemeler açısından birkaç iterasyonla sonuca gidilmesi hedeflenmiştir. Oysa DFSS de uygulanan DOE ve Taguchi araçları ile hem testler sırasında harcanan enerji minimize edilmiş, aynı zamanda maliyete doğrudan etki eden motor büyüklüğü, slip ring, yataklar, rulmanların tasarımları yönlendirilmiştir. Bölüm 6.2’de uygulanan DOE ve Taguchi sağlam parametre tasarımı detayları ile verilmektedir.

6.1. Yapısal analizler

QFD analizinde önem derecesine göre ele alınması gereken ikinci seviyedeki teknik özellikler doğal frekans, yapısal güvenlik faktörü ve numune ağırlığı, boyutsal ve yapısal tasarımın birer çıktısı olduğu ve birbirleri ile yüksek korelasyona sahip olduklarından aynı anda çalışılması gereken, birbirlerini doğrudan etkileyen teknik özelliklerdir. Bu özellikler çalışılırken gerçekleştirilmesi diğerlerine göre daha zor olan doğal frekans değeri (zorluk seviyesi 8) hedeflenerek diğer iki teknik özellik elde edilen seviyeye göre kontrol edilerek tasarımın olgunlaştırılması sağlanmıştır.

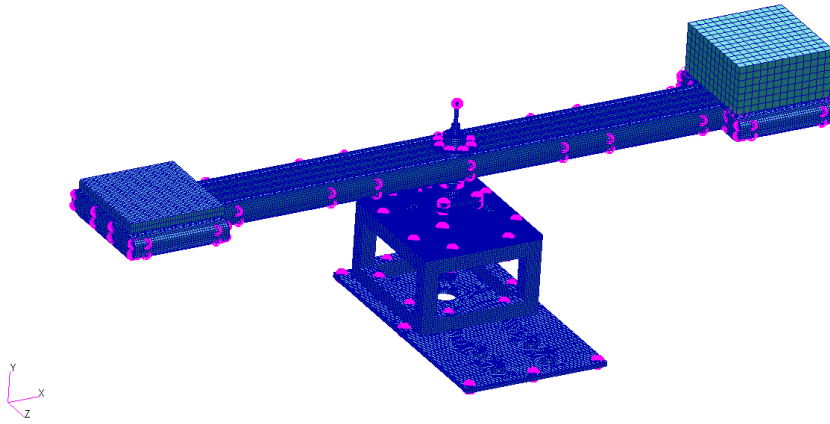
Statik dayanım analizleri ve modal analizler, genel amaçlı ileri seviye bir sonlu eleman çözücüsü olan MSC Nastran yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil-9). Analizlerin uygulama esasları ve sonlu eleman modelleme detayları N.

Kılıç ve diğ. tarafından sunulan bildiride detaylı olarak verilmiştir [42]. Statik ivme test düzeneği yapısı çelik ve alüminyum malzemelerden imal edilmiş ana parçaların ve hazır ek parçaların civata bağlantıları veya kaynak ile birleştirilmesi ile oluşan bir yapıdır. Analiz modeline yönelik sonlu eleman ağı oluşturulması öncesinde sağlıklı ve pratik süreler içerisinde çözülebilir bir analiz modeli elde edebilmek adına geometri üzerinde basitleştirme ve sadeleştirme işlemleri yapılmış, sonuçlara etkisi minimal olacağı öngörülen parçalar modelden tamamen kaldırılmış ya da noktasal kütle olarak modele eklenmiştir.

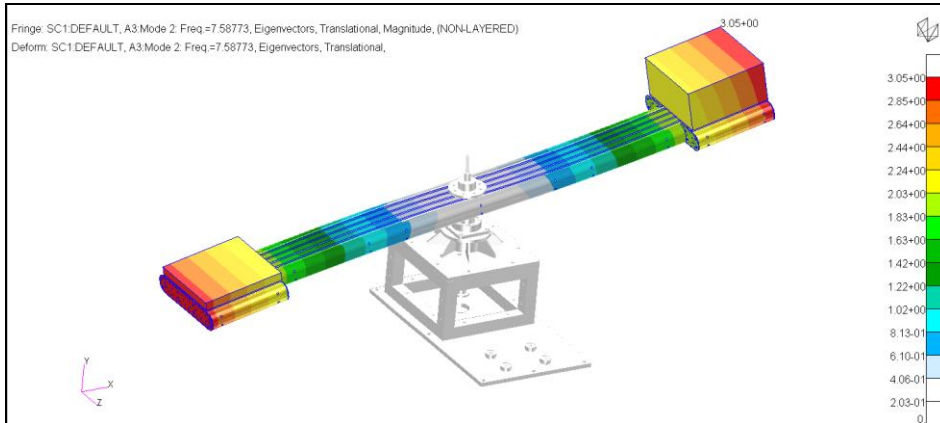
Yapının 200 rpm açısal hızda ve 10 g ivme yükü altında davranışı incelenmiştir. Statik analizlerde iki adet senaryo sonucu incelenmiştir. Birinci senaryoda iki adet 50 kg kütle eklenmiş, ikinci senaryoda test kütesinin fikstürden çıktığı durumdaki sonuçlar incelenmiştir. Yapının yere sabitlenen noktalarına ayrı ayrı RBE2 tipi bağlayıcı eleman tanımlanmış, RBE2 elemanlarının merkez düğüm noktalarına bütün yönlerinde sınır koşulu tanımlaması yapılmıştır. İlgili sınır koşulları altında gerçekleştirilen modal analizler sonucunda yapının

ilk doğal frekansı hesaplanmıştır. Yapının düşey yöndeki ilk eğme modu 7.6 Hz'de oluşmaktadır. Sistemin en çok 200 rpm'de (3.3Hz) çalıştırılacağı dikkate alındığında, yapının ilk modunun çalışma aralığının üstünde olduğu görülmektedir. Özetle çalışma sırasında dönen parçaların tahrikinden oluşacak bir rezonans riski görülmemiştir.

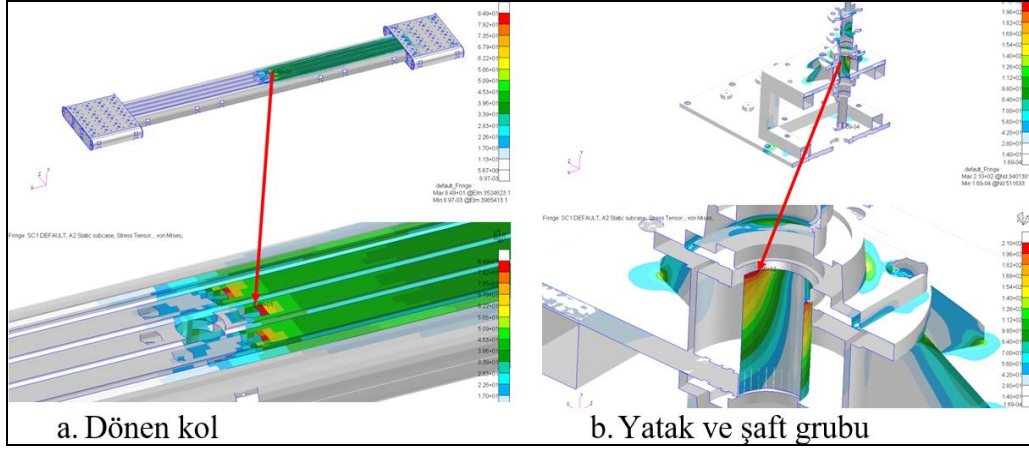
Mukavemet açısından değerlendirildiğinde minör iyileştirmeler sonrasında seçilen malzemelerin akma değerlerine göre 1.5 emniyet katsayısına ulaşılmıştır. Alüminyum parçalar için akma mukavemeti 145 MPa, çelik parçalar için 350 MPa kabul edilmiştir. Alüminyum parçalar için maksimum 85 MPa, çelik parçalarda ise maksimum 210 MPa gerilme değeri hesaplanmıştır. Şekil-10'da yapısal analiz sonuçları kol ve yataklar için gösterilmektedir. Şekilde gerilmeler eşdeğer Von Mises cinsinden MPa olarak verilmiştir. 50 kg test kütesi ile 200 rpm açısal hızda ve 1 g düşey ivme durumunda düzeneğin uçlarında 13.5 mm'lik deplasman oluşmakta olup güvenli seviyededir (Şekil-11).



Şekil 9. Yapısal analiz sonlu elemanlar çözüm ağı modeli



Şekil 10. Modal analiz sonucu bulunan ilk eğilme modu- deplasman değerleri normalize edildi[30]



Şekil 11. Yapısal analiz sonuçları [30]

Yapısal açıdan klasik deterministik ürün geliştirme süreciyle DFSS arasında belirgin bir fark görülememektedir. DFSS araçlarının kullanılmasının sadece önceliklendirme ve teknik isterler belirleme açısından bir katkısı olduğu fakat FEA analizlerinin gerekliliği ve sonuçları açısından fark yaratmadığı açıktır.

6.2. HAD ve Taguchi sağlam parametre tasarımı

Proje başında yapılan mühendislik hesapları, ivme, test kütlesi, yataklardaki sürtünme kayıpları ve akış kaynaklı dirençleri hesaba katarak 1.5 güvenlik katsayısıyla sistemi döndüren elektrik motorunun 7 kW'lık bir güce ihtiyacı olduğunu belirlemiştir. Ürün ile ilgili maliyet hesaplarında motor ve rulmanlı yataklar bu bilgi doğrultusunda seçildi. Oysa QFD çalışması bize, işletme maliyetlerinin müşteri açısından önemli bir karar aracı olduğunu göstermektedir. Bu aşamada işletme maliyetleri olarak öncelikle, test sırasında sistemin çekmekte olduğu enerji değerlendirilmiştir. Dönen sistemin ve tüm parçaların güvenlik sebebiyle bir yapı içerisinde yer alması gerekmektedir. Bu yapının şekli ve detayları, çekilen enerjiyi doğrudan etkilemektedir. En iyi ve kötü çözüm arasında üç kata varan oranlarda enerji ihtiyacı oluşmaktadır. Bu sebeple en düşük enerji harcamasını sağlamak amacıyla, kapalı muhafaza geometrisi, üst kapağın yapısı, yükseklik, bariyer çapı ve yapının tabanla olan boşluk miktarını değişken olarak tanımlandığı bir deney tasarımı yapılmıştır. Ortogonal L18 deney tasarımı matrisinde, bariyer çapı iki seviye, diğer parametreler üç seviye olarak modellenmiştir [43-44]. Deneyler parametreleri Tablo-7'de verilmiştir.

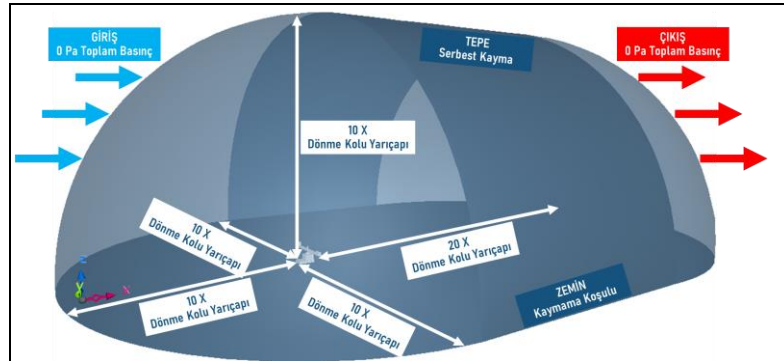
Deneyler, kurgulanan geometrileri kullanarak oluşturulan HAD analizleri olarak gerçekleştirilmiştir. HAD çalışmaları, öncelikle test

platformunun çevresinin açık olduğu ortamda hedef dönme hızlarını sağlamak için gerekli olan şaft gücü değerinin hesaplanması ile başlatılmıştır. Hesaplama hacmi boyutu, her ekseninde dönme kolunun 10 katı olarak alınmıştır (Şekil-12). Analiz için oluşturulan çözüm ağı, 7,2 milyon elemandan oluşmaktadır (Şekil-13). Analizler test ağırlığı olması ve olmaması durumu için tekrarlanmıştır. Analiz yaklaşık 4000 çevrim sonunda 10^{-5} seviyesinde bir yakınsamaya ulaşmaktadır. Yüksüz durumda (test numunesi ve karşı ağırlık olmadığı durumda) sistemi 190 rpm'lerde döndürmek için gerekli güç değeri yaklaşık 398 W olarak hesaplanmıştır. 50 kg'lık test numunesi ile birlikte gereken güç 2686 W'a çıkmaktadır. Kol üstündeki basınç değişiminin 474 Pa değerine kadar çıktığı bulunmuştur.

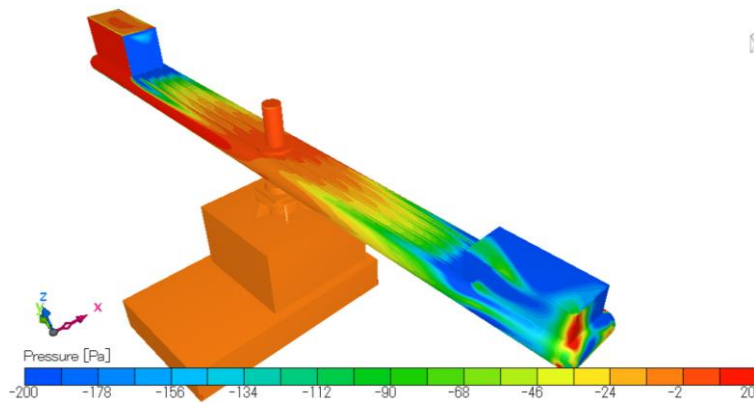
Deney tasarımında Tablo-7 de verilen L18 ortogonal matrisi kullanılarak sistemin çektiği güç değerleri toplanmıştır. Toplanan veriler Minitab yazılımı ile analiz edilmiştir [38]. Gerçekleştirilen Taguchi analizi sonucunda S/N değerlerinin minimum olması için gerekli parametreler belirlenmiştir. İlk aşamada “BariyerYüksekliği*TabanBoşluğu, BariyerYüksekliği*Üst kapama, BariyerYüksekliği*Geometri, Taban Boşluğu*Üst kapama, Taban Boşluğu*Geometri, Üst kapama*Geometri” etkileşimleri istatistiki olarak anlamsız çıktığı için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Çekilen enerjinin minimum olması durumunda “Bariyer çapının 3.4 m, bariyer yüksekliğini 1.2 m, taban boşluğunun olmadığı, üst kapamanın olduğu ve geometrinin ongen olduğu seçeneğin en düşük güç ihtiyacı doğuracağı görülmüştür. Belirtilen değişkenlerin etkisi Şekil-14'da verilmektedir.

Tablo 7. Deney tasarımı ve tasarım parametreleri

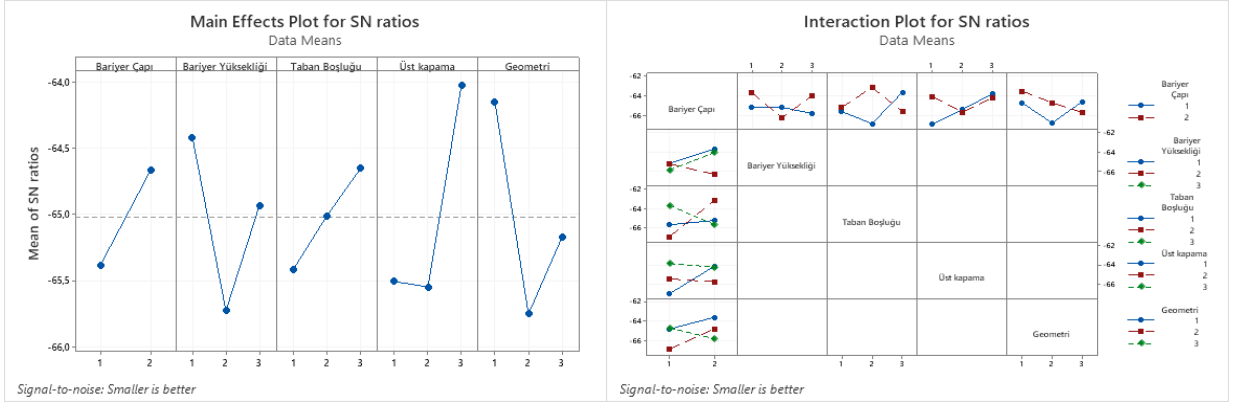
Geometri	Bariyer Çapı, m	Bariyer Yüksekliği, m	Üst Kapama	Taban Boşluğu, mm	Şaft Gücü- W
Sekizgen	3.4	1.2	Yok	0	1512
Dairesel	3.4	1.2	Tel Örgü	50	2217
Ongen	3.4	1.2	Kapalı	100	1090
Dairesel	3.4	1.5	Yok	0	1999
Ongen	3.4	1.5	Tel Örgü	50	2040
Sekizgen	3.4	1.5	Kapalı	100	1470
Sekizgen	3.4	2	Tel Örgü	0	2217
Dairesel	3.4	2	Kapalı	50	1430
Ongen	3.4	2	Yok	100	1200
Ongen	4	1.2	Kapalı	0	1080
Sekizgen	4	1.2	Yok	50	2061
Dairesel	4	1.2	Tel Örgü	100	2321
Ongen	4	1.5	Tel Örgü	0	1650
Sekizgen	4	1.5	Kapalı	50	1760
Dairesel	4	1.5	Yok	100	2275
Dairesel	4	2	Kapalı	0	1350
Ongen	4	2	Yok	50	1190
Sekizgen	4	2	Tel Örgü	100	1850



Şekil 12. Hesaplama hacmi gösterimi [30]



Şekil 13. HAD Analizi – 190 rpm dönme hızında açık ortamda basınç dağılımı



Şekil 14. Taguchi analizi ana parametrelerin etkileri ve birbirleri ile etkileşimleri

Yapılan HAD analizlerinde, yukarıda belirtilen çözümün 1020 W güç çektiği hesaplanmıştır. Değer, QFD çalışmasında en yüksek önem derecesine sahip teknik özellik için hedeflenen değere (1000 W) oldukça yakındır.

Klasik ürün geliştirme sürecinde test sırasında çekilen güç miktarının ürüne katkısı ihmal edilmiştir. Oysa QFD çalışması, ürünün kullanıcısı olan test merkezleri açısından bu faktörün en önemli faydayı sağladığı görülmektedir. Normal bir mühendislik yaklaşımı ile kanat formunun en büyük etkiyi oluşturacağı düşünülür. Oysa doğru kurgulanan bir deney tasarımı sonucunda bariyer çapı, bariyerlerin yerden yüksekliği, taban boşluğu ve geometrinin de çekilen güce önemli bir katkı yaptığı görülmektedir. Aynı güvelik katsayısı kullanılması durumunda bile elektrik motor gücünde %80'lik bir azalma olmaktadır. Bu hem ilk yatırım maliyetinde belirgin bir iyileşme sağlamak hem de işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

6.3. Güvenlik Analizleri

QFD çalışmasında, test sisteminin etrafında oluşturulan kapalı hacmin, enerji verimliliği

açısından önemli bir katkısının olmasının yanında birincil fonksiyonu kaza durumlarında insan sağlığını garanti altına alan güvenli bir bölge oluşturmaktır. Burada en kritik durum, test kütlesi veya karşı ağırlığın kopup, koruma duvarını aşması durumudur. Güvenlik çalışmasının amacı, toplamda 50 kg ağırlığa sahip karşı ağırlıkların 1.25 m dönme yarıçapında ve yaklaşık 200 rpm hızla dönerek bir bariyere çarpması sonucu oluşacak hasarın boyutunu belirlemektir. Bu analiz, bariyerin dayanıklılığını değerlendirmek ve elde edilen sonuçlara göre gerekli önlemleri almayı hedeflemektedir. Penetrasyon analizleri, gerek malzemenin lineer olmayan karakteristik özellikleri, gerekse yüksek gerinim hızlarında oluşan yırtılmanın modellenmesi açısından oldukça ileri seviye sonlu elemanlar analizleri olarak değerlendirilmektedir. LS-DYNA, penetrasyon analizlerinde kullanılan ve malzemenin doğrusal olmayan karakteristik özelliklerinin tanımlanabildiği bir yazılımdır. Çalışmada ilk aşamada mevcut durum incelenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda iyileştirmeler yapılarak yapı güvenli hale getirilmiştir. Kullanılan metodoloji Şekil-15'de verilen aşamalardan oluşmaktadır.



Şekil 15. Penetrasyon analizleri metodolojisi

Sonlu elemanlar çözüm ağı oluşturmada iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Yapının ana taşıyıcı ve mukavemet unsuru olan dik profiller için plastik deformasyon sebebiyle pekleşmeyi hesaplamalara dahil edecek şekilde Johnson-Cook malzeme modelinin basitleştirilmiş bir versiyonu kullanılmıştır [45]. Bu modelde gerinim hızı ve sıcaklık etkilerini modelin dışında bırakılarak, sadece akma ve gerinim sertleştirilmesine bağlı parametreler kullanılmıştır. Malzeme modeli test ile elde edilen sonuçları sağlayacak şekilde eğri uydurma yöntemi ile oluşturularak, A , B ve n malzeme sabitleri elde edilmiştir. LS-DYNA yazılımında MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı, belirtilen gereksinimleri karşılamaktadır ve basitlik, etkinlik ve geniş uygulanabilirlik gibi avantajları nedeniyle tercih edilir. Bu kart, malzeme davranışını tanımlamak için sınırlı sayıda parametre kullanır ve özellikle plastik deformasyon davranışını, yüksek hızlı ve yüksek sıcaklık koşullarında iyi yansıtır. Ayrıca, LS-DYNA gibi popüler simülasyon yazılımlarıyla entegre çalışabilir, bu da endüstriyel ve akademik uygulamalarda geniş bir kullanımı destekler. Bu nedenlerle, MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı, malzeme davranışının etkili bir şekilde modellenmesi için yaygın olarak tercih edilir.

$$\sigma_y = A + B \times \varepsilon_p^n \quad (7)$$

σ_y : Akma gerilmesi

ε_p : Efektif plastik gerinim

A , B , n : Malzeme sabitleri

Profillerin arasındaki sacların modellenmesi, LS-DYNA simülasyon yazılımı üzerinden MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme kartı kullanılarak yapılmıştır. Karşı ağırlıklarda ise, MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı tercih edilmiştir. Tüm yapılar için kullanılan malzeme modelleri ve parametreler Tablo-8'de verilmiştir.

Sınır koşullarını belirlemeden önce, 50 kg'lık karşı ağırlıklar, LS-DYNA üzerinden 6 serbestlik derecesinde serbest olarak modellenmiştir. Söz konusu ağırlıklar, 1.25 metrelik bir yarıçapta dönerek sistemi terk ederken iki farklı senaryo üzerinde durulmuştur. Bu senaryolarda özellikle, bariyer duvarının giriş tarafından desteklenmeyen kısımlarında gerçekleşebilecek çarpışma durumları incelenmiştir. Bu modelleme süreci, parçanın hareketi ve çarpma etkisinin detaylı bir şekilde analiz etmeyi hedeflemektedir. Çarpışma noktasının belirlenmesi ve oluşturulan karşı ağırlıkların konumlandırılmasının ardından yaklaşık olarak 200

rpm'lik dönme hızı ve dönme yarıçapı dikkate alınarak 25.8 m/s'lik bir çizgisel hız INITIAL_VELOCITY_GENERATION kartı kullanılarak her ağırlık için tanımlanmıştır. Hız tanımlaması yapılırken cisim üzerinde bir koordinat eksenini oluşturulmuş ve söz konusu karttaki hız değeri x ekseninde tanımlanmıştır. 50 kg ağırlığındaki karşı ağırlıkların bariyerle muhtemel temasını belirlemek için AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE kontak kartı algoritması kullanılmıştır. Ağırlıklar ile bariyer arasındaki temas için statik sürtünme katsayısı 0.3, dinamik sürtünme katsayısı ise 0.2 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, bariyerin kendi içindeki teması için AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE kontak kartı kullanılmıştır. Üretim ve maliyet açısından ilk aşamada uygun görülen kalınlıklarla yapılan analizlerde karşı ağırlıklar duvarlarda yırtılmalara sebep vermiştir.

Söz konusu yırtılmalar sonucunda, karşı ağırlıklar kapama duvarını geçememiş olmakla birlikte daha sistemin güvenli hale getirilmesi amacıyla tasarım ekibi tarafından optimizasyon çalışmasının devam edilmesine ve yırtılma olmayacak kalınlıkların belirlenmesine ve uygulanmasına karar verilmiştir (Şekil-16). Yapılan iterasyonlar sonucunda duvarlarda yırtılma olmayacak şekilde tasarım güncellenmiştir.

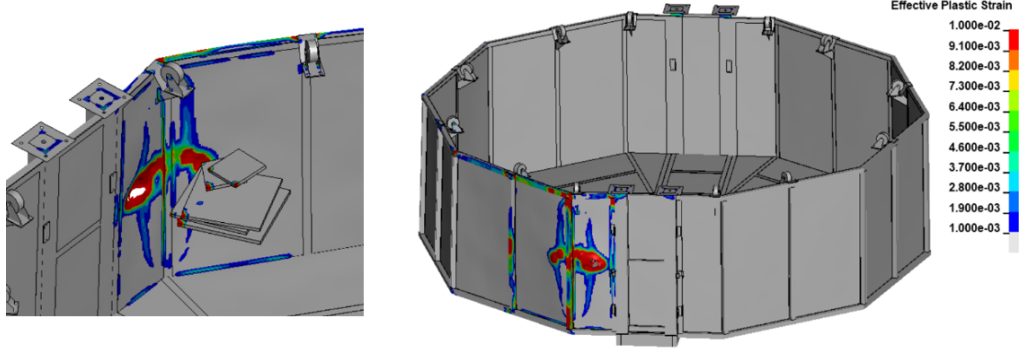
7. DOĞRULAMA AŞAMASI

Tasarım FMEA, kavramsal tasarım ve detay aşamaları sonucunda oluşturulan tasarım doğrulama planı aşağıda özetlenmektedir. Doğrulama planının oluşturulmasında ilk aşama QFD ve kalite evi çalışması olmuştur. Belirlenen teknik isterler önem sırasına göre ele alınıp, hedef değerler rakip analizleri ile belirlenmiştir. Aynı zamanda kavramsal tasarım aşamasında yapılan tasarım FMEA analizi ile risk oluşturan tasarım faktörlerinin değerlendirilmesi yapılmış ve riski azaltacak aksiyonlar oluşturularak, kavramsal tasarım ve detay tasarım çalışmaları bu faktörler ışığında ilerletilmiştir.

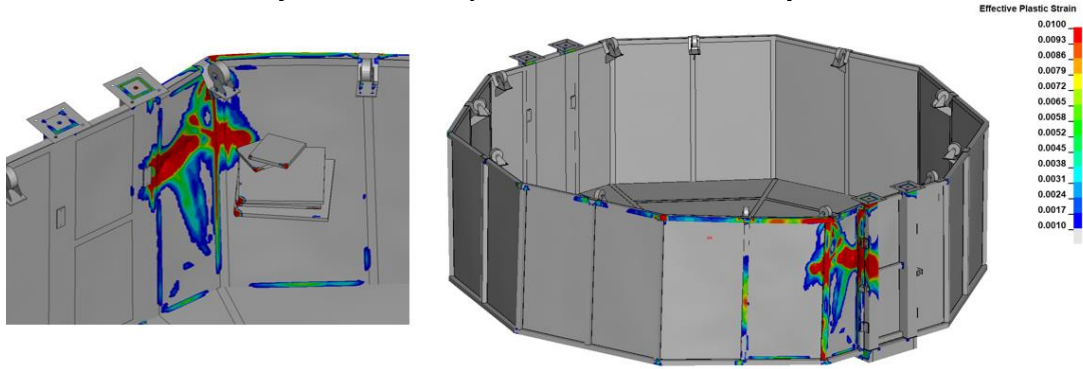
Doğrulama aşamasında santrifüj test sisteminin fonksiyonel çalışması, istenilen doğal frekans değerlerinin sağlanması ve güç ihtiyacının belirlenmesi önemli doğrulama adımları olarak görülmektedir. Bu özellikler fiziksel testler ile doğrulanmıştır. Modal test için kolun her iki tarafına 50 kg'lık test plakaları bağlandıktan sonra bir tarafa Dytran 3233A, ICP tip, 5 g, 3 eksenli bir ivme ölçer bağlanmıştır. Yapılan çekici ile tahrik sonucunda sistemde oluşan ivme değerleri IMC veri toplama sistemi ile toplanıp, analiz edilmiştir. Yapının düşey ekseninde ilk modu 9.3 Hz de görülmüştür. Şekil-18'de modal test sonuçları görülmektedir.

Tablo 8. Kullanılan malzeme model parametreleri

Profiller			Ağırlık		Kapama Sacları		
RO	Yoğunluk	7.85E-09	7.35E-09		RO	Yoğunluk	7.85E-09
E	Elastisite Modülü	2.00E+05	2.10E+05		E	Elastisite Modülü	2.12E+05
PR	Poisson Oranı	0.30	0.30		PR	Poisson Oranı	0.29
VP	Oran Etkilerinin Formülasyonu	1.00	1.00		SIGY	Akma Gerilmesi	265.00
A	Giriş Sabiti	448.00	255.98		ETAN	Tanjant Modülü	662.86
B	Giriş Sabiti	782.00	162.58		FAIL	Başarısızlık Bayrağı	0.22
N	Giriş Sabiti	0.562	0.257				
C	Giriş Sabiti	0.0247	0.0220				
PSFAIL	Başarısızlık Anında Elastik Plastik Gerinim	0.22	0.22				



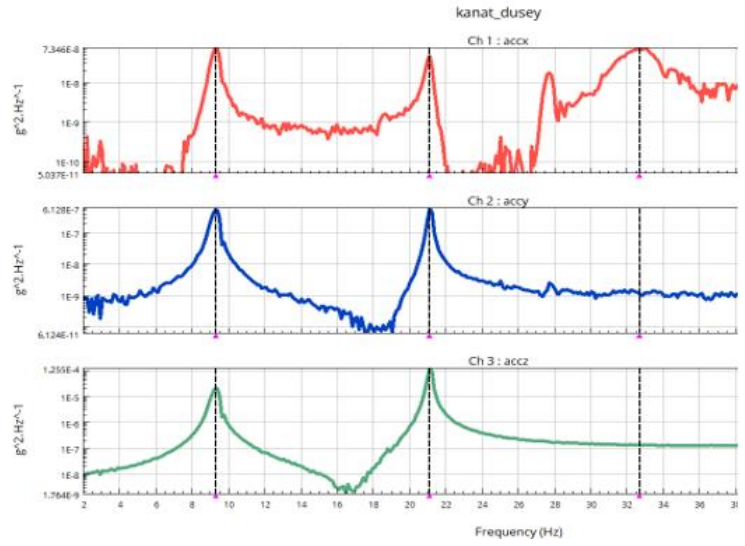
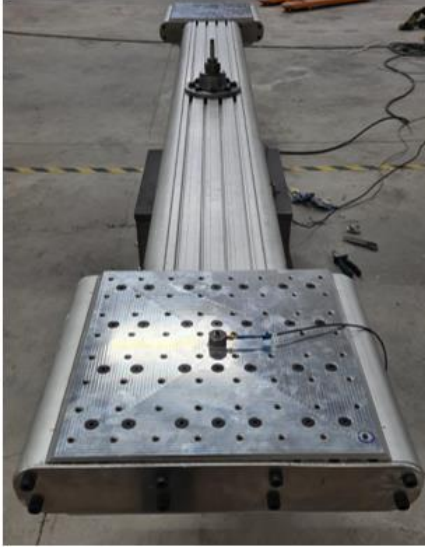
Şekil 16. Penetrasyon analizleri ilk tasarım sonuçları



Şekil 17. Penetrasyon analizleri iyileştirilmiş tasarım sonuçları

Tablo 9. Tasarım doğrulama planı

Teknik özellik tanımı	Hedef Değer	Test Yöntemi
Harcanan güç	1000 W	Fonksiyonel Test 50 kg kütle, 50 g ivme ve 200 rpm de motorun çektiği gücün ölçülmesi, 1100 W
Güvenlik Çemberi	Yırtılmayacak	Penetrasyon analizleri
İvme Değeri	50 g	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma
Mukavemet	Güvenlik faktörü 1.5	FE Analizleri
Sistemin Doğal Frekansı	7.5 Hz	Modal test sonuçları, ölçülen değer 9.3 Hz
Test Numunesi Ağırlığı	50 kg	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma
Maks. İvmeye Çıkma Süresi	5 dakika	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma 4.5 dakika
Ses seviyesi	60 dbA	
Anomali Tespit Sistemi	İvme ölçer kullanımı	Yaklaşım sensörü eklendi
Maks. İvmede Çalışma Süresi	60 dakika	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma 60 dakika çalışma
Test Numune Boyutları	200x200x200	Yerinde muayene



Şekil 18. Modal test sonuçları, kanat düşey eksenindeki veriler

Diğer fonksiyonel testler sistemi 200 rpm dönme hızında çalıştırarak gerçekleştirilmiş ve toplanan veriler Tablo-6'da özetlenmiştir.

8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Santrifüj statik ivme test düzenekleri savunma, havacılık ve uzay sistemlerinde sıklıkla kullanılan elektronik kutuların maruz kaldıkları yüksek yapısal ivmeler altında fonksiyonel ve dayanım açısından kabul ve doğrulama çalışmaları için önemli bir ihtiyacı karşılamaktadır. Bu sistemlerin hem ürün hasarları hem de kullanıcı personel açısından yüksek güvenilirlik kriterlerine sahip olması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirirken sisteme dahil edilen koruyucu yapıların sistem performansını hangi yönde etkileyeceği önemli bir bilgi olmaktadır. Test sistemleri düşük adetlerde ve özel ihtiyaca yönelik sistemler oldukları için, DFSS metodu ile ilk seferde doğru tasarım yaklaşımının kullanılması, ortaya çıkacak yüksek düzeltme ve iyileştirme maliyetleri, zaman kayıpları ve fonksiyonel isterlerin sağlanamamasının önüne geçeceği için dikkatlice uygulanmalıdır. Bu çalışmada ileri seviye ürün tasarımlarında uygulanan DFSS metodunun öne çıkan araçları olan QFD, DFMEA, DOE, Taguchi sağlam parametre tasarımı ve ileri mühendislik çözümleri kullanılarak hızlı ve etkin bir test sistemi tasarlanmıştır.

Proje başında klasik ürün geliştirme süreci uygulanacağı düşünülerek, 23,200 € personel maliyeti öngörülmüştü. DFSS sürecinde özellikle CFD analizleri ve optimizasyon çalışmaları sebebiyle mühendislik iş gücü harcaması 27,240 € olarak gerçekleşti. %18'lik bir artış oluştu. Ürün maliyetini oluşturan satın almalar 10,500 € olarak öngörüldü fakat optimizasyon çalışmaları sonucunda 9,790 €

olarak gerçekleşti. Aslında güvenlik açısından yapılan kapamanın oluşturduğu işçilik dahil 3,000 €'luk harcamayı dahil etmezsek, DFSS ile üründe %50 seviyesinde bir maliyet azaltma gerçekleşmiştir. Toplam proje maliyeti, revizyonların minimize edilmesi ve maliyet azaltma aksiyonları doğrultusunda 37,700 € olarak gerçekleşmiştir. Oluşan toplam maliyet kazancı %21 olmuştur. İlave mühendislik analizleri revizyon sürelerini ortadan kaldırdığı için toplam proje takviminde bir değişiklik olmamıştır.

Bu çalışmada özellikle geleneksel tasarım sürecinde prototip ürün üzerinde gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları, ileri mühendislik yazılımları ile sanal ortamda incelenmiş olup, projenin erken aşamalarında tekno-ekonomik sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan maliyete etkiyen tasarım değişiklikleri ile test için gerekli elektrik motoru kapasitesi, rulmanlar, şaft boyutları ve kullanılacak enerji miktarı belirgin seviyede azaltılarak verimli bir test altyapısı elde edilmiştir. Alınan aksiyonlar tasarımlara uygulandıktan sonra sistemin üretimi tamamlanarak kullanıma sunulmuştur. Yapılan doğrulama testleri sırasında herhangi bir revizyona ihtiyaç duyulmamış dolayısıyla süreçte kullanılan tasarım yöntemlerinin etkinliği, ilk seferde doğru ürün hedefinin sağlandığı gösterilmiştir.

CENTRIFUGAL STATIC ACCELERATION TESTER DEVELOPMENT WITH DFSS METHOD

The centrifugal static acceleration test systems are crucial for testing high acceleration levels due to operational loads in aviation, space and defense platforms. In this study, development steps were achieved using the design for six sigma method. In the first stage, customer requirements were transformed into technical requirements with the

Quality Function Deployment performed. In the second stage, with the design failure mode and effect analysis and conceptual design studies, the potential design vulnerabilities were identified and solutions developed. In the following step, orthogonal experimental design and Computational Fluid Dynamics simulations were performed for the safe and stable operation of the test platform and the reduction of the power requirement that will occur during the tests. Throughout the study, the right design at the first time was aimed by using design for six sigma tools such as quality function deployment, design of experiments, Taguchi robust parameter design, p-Diagram and design failure mode and effect analysis. In the light of the generated data, the detailed design of the test platform was completed. With the validation studies, the static acceleration test system was implemented. The effectiveness of the DFSS was compared to the classical Stage-Gate method by investigating the project performance parameters.

Keywords: DFSS, Stage-Gate method, QFD, Design FMEA, Design of experiment, Taguchi robust design parameters, Centrifugal acceleration tester

KAYNAKLAR

- Cooper, R.G., Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products. *Business Horizons*. (1990)
- Cooper, R.G., Winning with new products: Doing it right. *Ivey business journal*, 64 (2000) 6: 54-60.
- Dzulinski, A.C., Braghini Junior, A., Chiroli D.M.G., Design for Six Sigma: A Review of the Definitions, Objectives, Activities, and Tools *Engineering Management Journal* 35(2023) 2 :161-180.
- Bhat S., Antony J., Gijo E.V., Koul R, Cudney E A., Chakraborty A., A study on critical failure factors of Design for Six Sigma in Indian companies: results from a pilot survey. *TQM Journal* 35(2023) 4:1072-1093. <https://doi.org/10.1108/TQM-03-2022-0103>
- Yang, K., El-Haik, B. "Chapter 3- Design for Six Sigma" in *Design for Six Sigma:A Roadmap for Product Development*, McGraw-Hill, New York, 2003
- Aşçı, M.G., *Tasarımda Altı Sigma Araçları ve Sanayide Bir Uygulaması*, M.S. thesis, Uludağ Üniversitesi, 2017
- Sheikh, M., Rafique, S.M., The Use of Design for Six Sigma (DFSS) Methodology in Product Design, *Proceedings of the World Congress on Engineering* Vol I, London, U.K, 2013
- Mishra, N., Rane, S.B., Prediction and improvement of iron casting quality through analytics and Six Sigma approach. *Int J Lean Six Sigma* 10(2019) 189–210. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2017-0122>
- Birgören, B., *İstatistiksel Kalite Kontrolü* (Cilt 3). Nobel Yayınları, 2020
- Su F.M., Su C.T., TFT-LCD Contrast Ratio Improvement by Using Design for Six Sigma Disciplines *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 33(2020) 1.
- Rafiee V., Faiz, J., Robust Design of an Outer Rotor Permanent Magnet Motor Through Six-Sigma Methodology Using Response Surface Surrogate Model *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(2019) 10
- Nada, O.A., Elamy, M., Salman, M.M., Khader, K.M., Deabs A.A., Using design for six sigma to develop an innovative porous tibial implant and assessing the proposed design using finite element. *Results in Engineering*, 27 (2025) [doi/10.1016/j.rineng.2025.106646](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106646)
- Rane, S.B., Bidikar, S.G., Potdar, P.R., Reliability improvement of moulded case circuit breaker using Design for Six Sigma. *International Journal of Quality & Reliability Management* 42 (2025) 7: 2085-2120. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2024-0215>
- Su, C.T., Su, F.M., Yield improvement in color filter manufacturing using Taguchi methods and TRIZ's substance-field analysis, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 8(2018) 12:2198–2212
- Francisco, M. G., Junior, O. C., & Sant'Anna, Â. M. O. (2020). Design for Six Sigma integrated product development reference model through systematic review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 11(4), 767–795. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2019-0052>
- Shojaie, A. A., Kahedi, E. Auto parts manufacturing quality assessment using design for six sigma (DFSS), case study in ISACO company. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* (2019)
- Jain, I., Boxless bus bar system for distribution boxes: a novel design for efficiency, security, and reliability, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01847-6>
- Wang, T.J., Hwang, S.K., Combustion system design of a genset diesel engine by using dfss methodology, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 20(2019) 3: 539–547. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0051-6>
- Bidikar, S.G., Rane, S.B., Potdar, P.R., Product development using Design for Six

- Sigma approach: case study in switchgear industry. *Int J Syst Assur Eng Manag* 13 (2022)1:203–230.
<https://doi.org/10.1007/s13198-021-01199-4>
20. Francisco, M.G., Canciglieri Junior, O., Marcio, A., Santanna, O., Roadmap for product development based on design for six sigma method *International Journal of Lean Six Sigma* 14(2023) 5:989-1009
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2022-0131>
 21. Bashir, H., Ojiako, U., An integrated ISM-MICMAC approach for modelling and analysing dependencies among engineering parameters in the early design phase. *J Eng Des* (2020) 31:461–483
<https://doi.org/10.1080/09544828.2020.1817347>
 22. Erdil, N.O., Arani, O.M., Quality function deployment: more than a design tool, *International Journal of Quality and Service Sciences*, 2018. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-02-2018-0008>
 23. Mazlum, Y., *Kalite Fonksiyon Yayilimi (KFY) Yaklaşımı ile Entegratör Bilişim Teknolojisi Şirketlerinde Müşteri Memnuniyetinin Artırılması*, M.S. thesis, Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği, 2019.
 24. Akdag, H.C., İmer, H.P., Ergin, K.N., Internal customer satisfaction improvement with QFD technique, *Business Process Management Journal*, 22 (2016) 5:957–968.
 25. Cordeiro, E.C., Barbosa, G.F., Trabasso, L.G., A customized QFD (quality function deployment) applied to management of automation projects, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (2016) 5(8):2427–2436.
 26. Fahma, F., Iftadi, I., Putri, N.A., Customer requirement analysis of driver's seat design using Quality Function Deployment (QFD) case study : City Car, *Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering* (2015)173–177.
 27. Ford FMEA Handbook, 2003, Version 4.0
 28. Segismundo, A., Cauchick, A., Miguel, P., Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: a case study in an automotive company, *Int J Qual Reliab Manag* 25 (2008) 899–912.
<https://doi.org/10.1108/02656710810908061>
 29. Shaker, F., Shahin, A., Jahanyan, S., Developing a two-phase QFD for improving FMEA: an integrative approach, *Int J Qual Reliab Manag* 36 (2019)1454–1474.
<https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2018-0195>
 30. Taguchi, G., Chowdhury, S., Taguchi, S., *Robust Engineering*. McGraw Hill, New York, USA, 2000.
 31. Silva, M.B., Carneiro, L.M., Silva, J.P.A., Oliveira, I.S., Filho, H.J.I., Almeida, C.R.O., An application of the Taguchi method (Robust design) to environmental engineering: Evaluating advanced oxidative processes in polyester-resin wastewater treatment, *American J. Analytical Chemistry* 5 (2014) 13: 828–837.
 32. Gopalsamy, B. M., Mondal, B., Ghosh, S., Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel, *J. Scientific & Industrial Research* (2009) 68:686–695.
 33. İç, Y.T., Ülke, İ., Çelik, Y., Yurdakul M., Diyaframla Sac Şekillendirme İşleminde 15-5PH Malzeme İçin Sayısal ve Deneysel Tasarım Yöntemleri Kullanılarak Geri Esnemenin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 22(2024) 2: 93-102
<https://doi.org/10.56193/matim.1543433>
 34. Gürbüz, H., Baday, S., Hamarat, İ., CNC Tel Elektro Erozyon Tezgâhında Tel Elektrot Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 16(2018) 1: 20-29
 35. Moir I., Seabridge, A., Chapter 13- Environmental Conditions in *Aircraft Systems*, John Wiley & Sons, Third Ed. West Sussex, 2008.
 36. Sause, G. R., Jasiuniene, E., Environmental and Operational Influences in *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*, Springer, 2021
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3>
 37. MIL-STD-810-G Method 513,6 Acceleration, Department of Defense, USA,
 38. Pedrammehr, S., Najdovski, Z., Abdi, H., Nahavandi, S., Design methodology for a hexarot-based centrifugal high-G simulator, *IEEE International Conference on Systems* (2017) Banff, Canada
 39. Alkayis, M.H., Onur, M.I., Laboratory-scale geotechnical centrifuge test system design and consolidation behavior analysis, *Arabian Journal of Geosciences* 15(2022) 995.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-09375-3>
 40. Zhou, Y.G., Sun, Z.B., Chen, Y.M., Zhejiang University benchmark centrifuge test for LEAP-GWU-2015 and liquefaction responses of a sloping ground. *Soil Dyn Earthq Eng* 113 (2018) 698.
 41. Koziol, S., Derlukiewicz, D., Method of assessing the quality of the design process of construction equipment with the use of DFSS

- (design for Six Sigma). *Automation in Construction* 22 (2012) 223–232.
42. Kılıç, N., Demir, R., Osso, C., Özcan, S., Özen, S., İleri Mühendislik Yöntemleri ile Statik İvme Test Düzeneği Tasarımı, 11. Savunma Teknolojileri Kongresi, Ankara, 2024
43. Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M., *Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.
44. Minitab User's Guide 2: Data analysis and quality tools. Release 13, State College, 2000.
45. Johnson, G.R., Cook, W.H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: *Proceedings of the 7th international symposium on ballistics*, Hauge, (1983) 541–547.

Gürcan Samtaş* 

Düzce Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği,
Düzce, Türkiye

GGG40 Dökme Demirin Kriyojenik ve Kriyojenik İşlem Görmemiş Kesici Uçlarla Frezelenmesinde Kesme Sıcaklık Değerlerinin Taguchi ve Yapay Sinir Ağı Algoritmaları ile Tahmini ve Kesme Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi

GGG40, en yaygın kullanılan nodüler dökme demir alaşımıdır ve baskın olarak ferritik bir yapıya sahiptir. Bu malzeme, iyi darbe direnci, yüksek elektrik iletkenliği, iyi uzama özellikleri ve manyetik geçirgenlikle birleştirilmiş mükemmel bir işlenebilirliğe sahiptir. Bu malzeme son derece tok olduğundan, büyük kuvvetlere maruz kalan ekipmanlar için uygundur. Bu çalışmada GGG40 dökme demire, iki farklı kesici uç (kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kaplamasız uç), üç farklı kesme hızı (280, 360 ve 480 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0,15, 0,35, 0,55 mm/diş) kullanılarak yüzey frezeleme işlemi uygulanmıştır. Deneyler sonrası kesici takımların talaş kaldırmaya başlamasından 3 saniye sonra yaklaşık iş parçası orta noktasında, termal kamera kullanılarak kesme bölgesindeki sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımda Taguchi L18 ortogonal dizi kullanılmış ve 18 adet deney yapılmıştır. Deneyler sonrası elde edilen sıcaklık değerleri optimize edilmiş ve elde edilen optimize değerler; kriyojenik işlem görmemiş kesici uç, 480 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/diş ilerleme oranı olarak bulunmuştur. Taguchi tahmin denklemleri ve yapay sinir ağı algoritmaları kullanılarak deney sonuçlarının tahmin değerleri bulunmuştur. Taguchi ortalama tahmin hata değeri %10,34, yapay sinir ağı için ortalama tahmin hata değeri %6,45 olarak elde edilmiştir. Kesme parametrelerinin etki yüzdesi için yapılan varyans analizinde sıcaklığa etki eden en etkili parametre %34,55 ile kesme hızı olmuştur. Çalışmada minimum sıcaklık için en etkili kesici ucun, kriyojenik işlem görmemiş kesici uç olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Taguchi, Yapay Sinir Ağları, Termal Ölçüm, Kesme Sıcaklığı, GGG40

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 12 Ocak 2025

Kabul: 26 Kasım 2025

*Sorumlu Yazar: Gürcan Samtaş

Email: guncansamtas@duzce.edu.tr

DOI:

<https://doi.org/10.56193/matim.1618497>

1. GİRİŞ

Dökme demirlerin gelişen kullanım alanları ile birlikte farklı ihtiyaçlar için daha yüksek performanslı malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda dökme demirler üzerinde geliştirilmeler yapılmıştır [1]. Malzemelere uygulanan alaşımlama teknolojisinin gelişmesi ile birlikte, dökme demirin istenilen özellikte ve istenilen kullanım alanına sahip olması sağlanmaktadır. Dökme demirlerde alaşımlama sırasında karbonun katılması ile alaşımın içerisinde oluşturduğu şekil ve biçimler dökme demirin tiplerini belirlemektedir. Dökme demirlerde çeşitli şekillere göre gruplama; malzemenin kompozisyonu, üretim

yöntemi, soğuma hızı ve ısıtılmalara göre belirlenmektedir [2]. Eriyik demirin dökümden önce az miktarda magnezyum (Mg) veya seryum (Ce) gibi küreselleştirici elementlerin ilavesi ile alaşımlanması sonucu küresel grafitli dökme demir oluşturulmaktadır [3]. Grafitin yuvarlak şekli, malzemenin çatlama veya kırılma eğilimini ortadan kaldırıp çatlakların malzeme içinde yayılmasını önlemeye yardımcı olmaktadır. Böylece yapı mükemmel gerilme mukavemetine ve sünekliğe sahip yeni bir malzeme olmaktadır. Üstün mekanik özellikleri sayesinde küresel grafitli dökme demirler özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Ayrıca bu üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra ulaşılabilir ve düşük maliyetlerinden dolayı

mühendislik sektöründe çelik dökümlerin veya dövmelemlerin yerini almaktadır [4].

Aslantaş ve Uçun'un yaptığı çalışmada ferritik yapıya sahip östemperlenmiş sfero dökme demirin işlenebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı sfero döküm malzeme ve sermet ve seramik olmak üzere iki farklı tipte kesici takım kullanılmıştır. Hem seramik hem de sermet takımların performansı, yüzey pürüzlülüğü ve takım yanak aşınmasına göre değerlendirilmiştir. Kesici takımların aşınma durumları elektron mikroskobu ile incelenmiştir [5]. Dearnley sementit karbürlü ve seramik kesici takımlar kullanarak gri ve küresel grafitli dökme demirlere tornalama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada küresel grafitli demiri tornalarken gri dökme demire göre yüksek kesme hızlarında kesici kenarda aşınmalar ve kırılmalar olduğu görülmüştür. Küresel grafitli demir tornalanırken kaplanmış semente karbür kesici takımlarda hızlı aşınma meydana gelirken, gri dökme demiri tornalarken ise aşınmaların daha yavaş olduğu görülmüştür [6]. Adır, östemperlenmiş GGG-70 küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliğini araştırmıştır. Numuneleri 120 dakikada 930 °C'de östenitledikten sonra 350 °C'de 120 dakika östemperleme ısı işlemi yapmıştır. Farklı talaş derinlikleri, kesme hızı ve ilerleme oranları kullanarak kesme kuvveti, kesici takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri ölçülmüştür. İşlenebilirlik testleri sonunda talaş derinliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu bulunmuştur [7]. Koçak ve Uzun yaptığı çalışmada, krank mili olarak kullanılan GGG-90 sfero dökümün sermet ve karbür kesici takımlarla işlenmesinde takım aşınmasının kesme kuvvetine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında sermet takım, yanak aşınması açısından karbür takımdan daha iyi performans göstermiş, ayrıca karbür takım ile yapılan testlerde daha düşük kesme kuvvetleri elde edilmiştir [8]. Yan vd. büyük boy sfero dökme demirin hassas frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında; kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü doğrusal olarak azalırken, yüzey pürüzlülüğünün değişim eğilimi ilerleme hızı ve kesme derinliği olarak anlamlı bir sonuç vermemiştir. Kesme hızı arttıkça, talaş boyutunun küçüldüğü ve talaş yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir [9]. Yüksek Kromlu Dökme Demir çoğunlukla şiddetli aşınma ve korozyon koşulları altındaki ortamlarda kullanılır, bu malzeme üzerinde niyobyum eklenmiş araştırmalarda aşınma direnci konusunda olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Da Silva vd. yaptığı çalışmada, %0,5 Nb ilavesinin %25,6 Cr ve %3,2 C ile bir yüksek kromlu dökme demir alaşımının mikroyapısı ve işlenebilirliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneler ısı işlemi tabii tutulmuş ve daha sonra kuru kesme koşullarında işlenmiştir [10]. Da Silva vd. yaptığı bu çalışmada, kompakt grafitli dökme demirlerin

frezeleme işleminde mikro yapıdaki (matris ve grafit) değişikliklerle işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Girdi değişkenleri olarak iş malzemesinin üç farklı versiyonu (normal versiyon; rafine grafitli; rafine grafitli ve Mo ilaveli), iki farklı kesme hızı, ilerleme hızı, takım geometrileri, takım kaplamaları ve işleme atmosferlerine bakılmıştır. İşlenebilirlik, takım ömrü ve aşınma mekanizmaları, yüzey kalitesi ve elektrik akımı tüketimi dikkate alınarak değerlendirilmiştir [11]. Yang vd. grafit parçacıklarının dağılımının ve boyutunun nodüler dökme demirin işlenebilirliğine etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, hem deneyler hem de simülasyon sonuçları, grafit nodülleri nedeniyle kesme yolu boyunca boşlukların ve çapakların ortaya çıktığını, bunun da yüzey kalitesini düşürdüğünü ve parçaların sonraki kullanımını etkilediğini göstermiştir [12]. Binali ve Kuntoğlu yaptıkları çalışmada, GGG 50 dökme demirin tornalanmasında kesme kuvvetlerini optimizasyonunu ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmada Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanmışlardır. Kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine olan etkileri; istatistiksel analiz, optimizasyon yaklaşımı ve grafiksel olarak araştırılmıştır [13]. Lanc vd. Nodüler döküm demir tornalama sırasında kaplanmış sermetin takım ömrünün tespitini incelemişlerdir. Sermet takımlara PVD tekniği ile uyguladıkları kaplamaların işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, kaplamaların uygulanmasının takım ömrünü uzattığı bulunmuş olsa da sermet-kaplama kombinasyonları çok katmanlı kaplamalara sahip semente karbür gibi diğer malzemelerin performansını aşmamıştır. Ayrıca çalışmada, takım aşınmasının çeşitli aşamalarında yüzey pürüzlülüğünün kararlılığı da incelenmiştir [14].

Yapılan literatür taramasında GGG40 malzemesine yüzey frezeleme işlemi uygulanarak, kesme sıcaklıklarının değerlendirildiği ve tahmin sonuçlarının elde edildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada; kriyojenik işlem uygulanmamış kaplamasız (normal kesici uç) kesici uç, kriyojenik işlem uygulanmış kaplamasız kesici uç olarak iki farklı kesici uç, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme kullanılarak EN-1563-GJS-400-15 dökme demire yüzey frezeleme işlemi uygulanmıştır. Her bir deney esnasında termal kamera ile kesme bölgesi sıcaklıkları ölçülmüştür. Deneysel tasarımda Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılarak 18 deney gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Taguchi tahmin denklemi ve yapay sinir ağları kullanılarak deneysel sonuçlar için tahmin değerleri elde edilmiş ve tahmin değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca Taguchi metodu kullanılarak minimum kesme sıcaklığı değerleri için optimum parametreler elde edilmiş, kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkileri varyans analizi ile değerlendirilmiştir.

2. MALZEME VE METOT

Literatür araştırması dikkate alınarak frezeleme deneylerinde 70x200x80 mm ebatlarında GGG40 küresel grafitli dökme demir malzeme kullanılmıştır. Malzemenin teknik bilgileri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Bu deneylerde, WIDIA firmasına ait THM-U kodlu kaplamasız kesici uçlar kullanılmıştır (Şekil 1). Takım tutucu olarak WIDIA firmasına ait iki ağızlı Victory M1200 mini takım tutucu kullanılmıştır (Şekil 1). Şekil 1’de sol tarafta uçların bağlandığı takım tutucu sağ tarafta ise kesici uç detayına yer verilmiştir. Kesici uç; ön yüzünde 6 kesici kenara, arka yüzünde de 6 kesici kenara sahip olmak üzere toplam 12 kesme kenarına sahiptir.

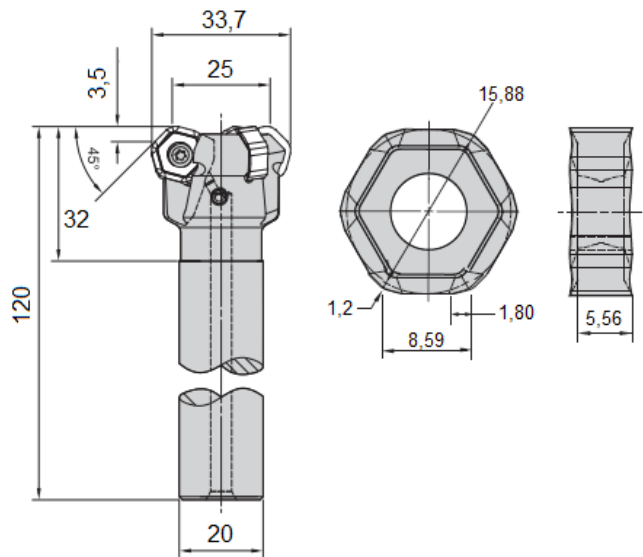
Bu çalışmada, kesme derinliği 0,50 mm olarak sabit tutulmuş ve kuru işleme şartlarında deneyler yürütülmüştür. Literatür dikkate alınarak, kesici uçların bir kısmına 24 saat -175 °C’de kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlem uygulanan kesici uçlara kriyojenik işlem sonrası 150 °C’de 2 saat temperleme işlemi yapılmıştır [17, 18]. Kesme bölgesindeki sıcaklık ölçümleri Fluke TiS20 model termal kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, kesici uç malzemenin orta kısmına geldiğinde yapılmıştır. Termal kamera, -20 °C ile 350 °C arasında ölçüm yapabilen, 120x90 piksel dedektör çözünürlüğüne sahip, 35,7° x 26,8° görüş alanı olan ve 9 Hz kare hızına sahip bir cihazdır. Kullanılan malzemenin salınım gücü değeri 0,82 olarak ayarlanmıştır.

Tablo 1. GGG40 dökme demire ait bileşenler [15].

C	Fe	Mg	Mn	P	Si	S
3,25-3,7 %	92,83-94,19 %	0,040-0,070 %	0,10-0,30 %	0,15-0,080 %	2,4-3 %	0,005-0,020 %

Tablo 2. GGG40 dökme demire ait mekanik özellikler [15].

Yoğunluk	Sertlik, Brinell	Çekme Dayanımı	Kopma Uzaması
7,30 g/cm ³	140-180	240 MPa	11 %



Şekil 1. Takım tutucu ve kullanılan kesici uç detayları [16]

3. TAGUCHİ OPTİMİZASYONU

Deneysel tasarımda, Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılarak [L18 ($2^1 \times 3^2$)] 18 deney gerçekleştirilmiştir. S/N (Signal to noise) oranları için Taguchi en küçük en iyi karakteristik seçilmiştir.

Dolayısıyla kesme sıcaklığı değerleri için en küçük en iyi arzu edilmektedir. Deneyler için belirlenen kesme parametreleri ve bu parametrelerin

seviyelerine ait bilgiler ise Tablo 3'te, deneysel sonuçlar ve deneysel sonuçlara ait S/N oranları da Tablo 4'te verilmiştir.

Yürütülen 18 deney sonrası kesme sıcaklığı için S/N oranı ortalama değeri ($T_{S/N}$) -32,52 dB Tablo 5'te kesme parametreleri, seçilen ortogonal diziye göre farklı seviyeler ve olası etkileri göz önünde bulundurularak ayırt edilmiştir. Bu tablo, Taguchi tahmin değerlerinin hesaplanmasında kullanılacaktır.

Tablo 3. Deneysel tasarım için kullanılan parametreler ve seviyeleri

	Parametreler	Seviyeler		
		1	2	3
A	Kesici uç (Ct)	Kriyojenik işlem görmemiş uç (NI)	Kriyojenik işlem görmüş uç (CI)	-
B	Kesme hızı (V, m/dak)	280	360	480
C	İlerleme oranı (f, mm/diş)	0,15	0,35	0,55

Tablo 4. Deneysel tasarım, deney sonuçları ve S/N oranları

Deney no	Kesme Parametreleri			Deneysel Sonuçlar ve S/N Oranları	
	A Kesici uç (Ct)	B Kesme hızı, V (m/dak)	C İlerleme oranı, f (mm/diş)	T (°C)	S/N oranları
1	NI	280	0,15	42,1	-32,4856
2	NI	280	0,35	58,9	-35,4023
3	NI	280	0,55	51,5	-34,2361
4	NI	360	0,15	46,2	-33,2928
5	NI	360	0,35	38,1	-31,6185
6	NI	360	0,55	37,8	-31,5498
7	NI	480	0,15	33,4	-30,4749
8	NI	480	0,35	35,3	-30,9555
9	NI	480	0,55	35,8	-31,0777
10	CI	280	0,15	40,2	-32,0845
11	CI	280	0,35	45,9	-33,2363
12	CI	280	0,55	46,2	-33,2928
13	CI	360	0,15	38,7	-31,7542
14	CI	360	0,35	58,1	-35,2835
15	CI	360	0,55	43,1	-32,6895
16	CI	480	0,15	37,9	-31,5728
17	CI	480	0,35	37,5	-31,4806
18	CI	480	0,55	43,8	-32,8295

Tablo 5. Parametreler için S/N oranları ortalamaları

Parametreler	Seviye (En küçük en iyi)			Delta
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
S/N oranları (dB)				
A (Kesici uç, Ci)	-32,34	-32,69	-	0,35
B (Kesme hızı, V)	-33,46	-32,70	-31,40	2,06
C (İlerleme oranı, f)	-31,94	-33,00	-32,61	1,05

Kesme parametreleri için optimizasyon grafiği Şekil 2'de gösterilmektedir. Çalışmada, kesme parametrelerinin optimal kombinasyonunu belirlemek için deneysel sonuçlara ait tüm seviyeler için en düşük ortalama değerleri değerlendirileceğinden Taguchi “En küçük en iyi” karakteristik seçilmiştir. Buna göre kesme sıcaklıkları için optimal kombinasyon $A_1B_3C_1$ (A_1 = normal kesici uç, B_3 = 480 m/dak kesme hızı, C_1 = 0.15 mm/diş ilerleme oranı) olarak bulunmuştur.

4. TAGUCHİ VE SINIR AĞLARI İÇİN TAHMİN DEĞERLERİNİN BULUNMASI

Taguchi tahmin değerlerinin hesaplanmasında, Tablo 5 ve Eşitlik (1) dikkate alınmaktadır [19, 20]. Taguchi tahmin değerleri şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_{PV} = 10^{-\frac{(A_m + B_n + C_k - 2T_{S/N})}{20}} \quad (1)$$

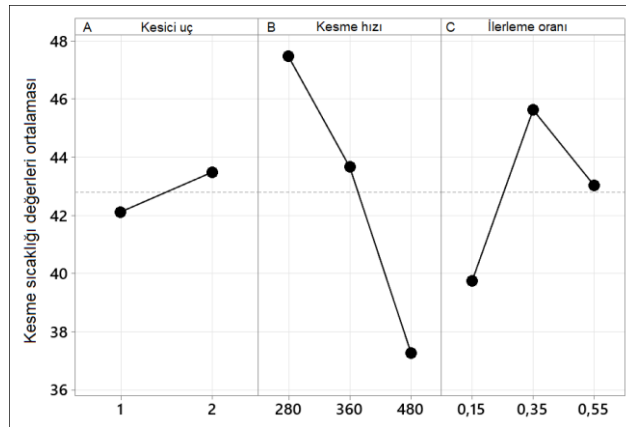
Eşitlik 1’de m, n ve k; Tablo 5 dikkate alınarak, A (kesici uç., B (kesme hızı) ve C (ilerleme), parametrelerine ait S/N oranlarıdır. $T_{S/N}$, kesme sıcaklığı S/N oranları ortalamasıdır. Tablo 5 dikkate alınarak, Eşitlik 1 kullanılarak elde edilen Taguchi tahmin (T_{PV}) ve elde edilen yapay sinir ağı değerleri Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6’da Taguchi tahmin denklemi ve yapay sinir ağı en iyi modeli kullanılarak, kesme sıcaklığı için hesaplanan tahmin değerleri ve hata değerleri verilmiştir. Burada deneysel sonuçlara en yakın tahmin değerleri yapay sinir ağı tahmini ile elde edilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde Taguchi ortalama tahmin hata değeri %10,34, yapay sinir ağı için ortalama tahmin hata değeri % 6,45 olarak

hesaplanmıştır. Tahmin değerlerinin ve deneysel değerlerle karşılaştırılması Şekil 3’de gösterilmiştir.

Şekil 3a’da kesme sıcaklık değerleri ile Taguchi tahmin değerlerinin karşılaştırma grafiği, Şekil 3b’de kesme sıcaklık değerleri ile ve yapay sinir ağı tahmin değerlerinin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın en iyi tahmin değerleri yapay sinir ağı tahmini ile elde edilmiştir. Yapay sinir ağı, biyolojik nöronların birlikte çalışarak olayları tanımlama, seçenekleri değerlendirme ve sonuçlara ulaşma biçimini taklit eden süreçleri kullanarak, insan beynine benzer şekilde kararlar alan bir makine öğrenme modelidir. Büyük veri kümeleri üzerinde eğitilen yapay sinir ağları, son yıllarda konuşma ve görsel tanıma görevlerinde ve diğer birçok uygulamada çığır açan gelişmeler elde etmiştir [21-23]. Tablo 7’de, kesme sıcaklığı için yapay sinir ağı girdi parametreleri verilmiştir. Her iki parametrede de network tipi olarak MLP (Multilayer Perceptron) kullanılmıştır [24, 25]. Yapay sinir ağı analiz biçimi olarak regresyon kullanılmıştır. Ayrıca eğitim algoritması olarak BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) algoritması, gizli aktivasyon üstel (Exponential), çıkış aktivasyonu olarak lojistik (Logistic) kullanılmıştır.

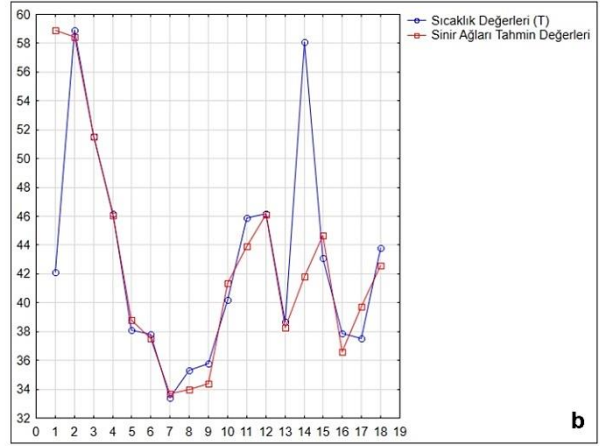
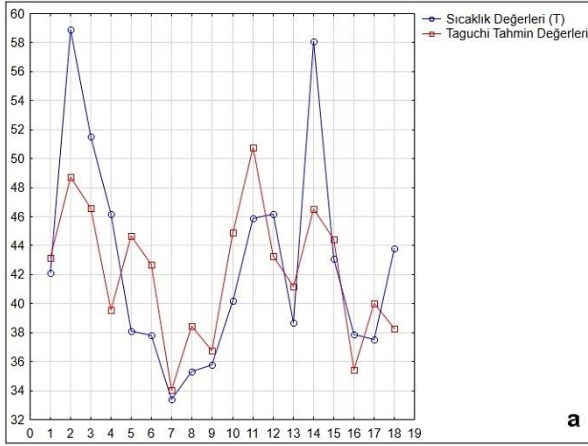
Bu çalışmada kesme sıcaklığı için 5 farklı ağ modeli kullanılmıştır. Tablo 8’de kesme sıcaklığı değerleri için kullanılan yapay sinir ağı modelleri verilmiştir. Burada en iyi performansı 1 numaralı model (MLP 3-5-1, MLP giriş katmanı-gizli katman-çıkış/hedef) vermiştir. Dolayısıyla kesme sıcaklığı tahmin değerlerinin hesaplanmasında bu model kullanılmıştır.



Şekil 2. Kesme parametreleri için optimizasyon grafiği

Tablo 6. Kesme sıcaklıkları deneysel sonuçları ile Taguchi ve yapay sinir ağı tahmin değerleri

Dency no	Kesme Parametreleri			Sonuçlar				
	A	B	C	T (°C)	Taguchi Tahmin	Hata (%)	Yapay Sinir Ağları Tahmin	Hata (%)
1	1	1	1	42,1	43,15	2,49	58,90	39,90
2	1	1	2	58,9	48,75	20,82	58,45	0,77
3	1	1	3	51,5	46,61	10,49	51,52	0,04
4	1	2	1	46,2	39,53	16,87	46,07	0,28
5	1	2	2	38,1	44,66	17,22	38,83	1,92
6	1	2	3	37,8	42,7	12,96	37,52	0,75
7	1	3	1	33,4	34,04	1,92	33,68	1,07
8	1	3	2	35,3	38,45	8,92	33,98	3,88
9	1	3	3	35,8	36,77	2,71	34,38	4,13
10	2	1	1	40,2	44,92	11,74	41,34	2,84
11	2	1	2	45,9	50,75	10,57	43,93	4,48
12	2	1	3	46,2	43,25	6,82	46,14	0,13
13	2	2	1	38,7	41,16	6,36	38,30	1,04
14	2	2	2	58,1	46,5	24,95	41,79	39,02
15	2	2	3	43,1	44,46	3,16	44,66	3,62
16	2	3	1	37,9	35,44	6,94	36,59	3,58
17	2	3	2	37,5	40,04	6,77	39,71	5,89
18	2	3	3	43,8	38,28	14,42	42,61	2,79



Şekil 3. Sıcaklık değerlerinin Taguchi ve yapay sinir ağı tahmin değerleriyle karşılaştırılması

Şekil 4’de görüldüğü gibi deneysel değer çizgisine en yakın sonuçları 1 numaralı model vermiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkileri Varyans analizi ve 3 boyutlu grafiklerle değerlendirilmiştir.

5.1. Varyans Analizi

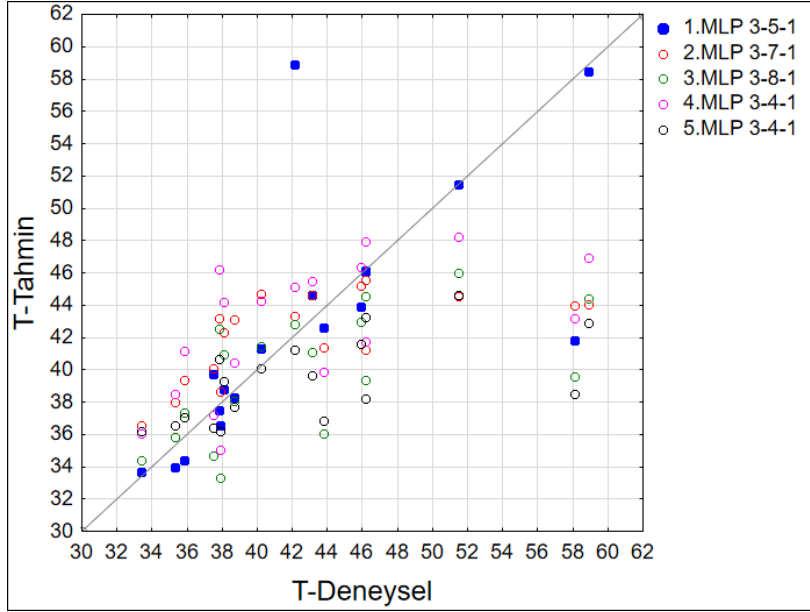
Kesici uç, kesme hızı ve ilerlemenin kesme sıcaklıkları üzerine etkileri ANOVA metodu ile analiz edilmiştir. ANOVA değerleri Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 7. Kesme sıcaklık değerleri için yapay sinir ağı detayları

Çıktı/hedef	Örnekleme Yöntemi	Eğitim (%)	Test (%)	Doğrulama (%)	Örnekleme	Ağ Tipi	Minimum Gizli Birim	Maximum Gizli Birim
Kesme sıcaklığı	Random	70	15	15	2000	MLP	3	10

Tablo 8. Kesme sıcaklığı için kullanılan yapay sinir ağı modelleri

Model	Ağ Adı	Eğitim Performansı	Eğitim Hata	Eğitim Algoritması	Gizli Aktivasyon	Çıktı Aktivasyon
1	MLP 3-5-1	0,984	0,729	BFGS 0	Exponential	Logistic
2	MLP 3-7-1	0,669	14,188	BFGS 3	Exponential	Logistic
3	MLP 3-8-1	0,772	14,312	BFGS 4	Tanh	Identity
4	MLP 3-4-1	0,732	10,940	BFGS 3	Exponential	Exponential
5	MLP 3-4-1	0,816	16,573	BFGS 2	Tanh	Logistic



Şekil 4. Bütün ağ modelleri için deneysel ve tahmin grafiği

Tablo 9. Varyans analizi sonuçları

Kesme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F - Value	P- Value	Yüzde Dağılım (%)
Kesme sıcaklığı (T-°C)						
Ct	1	8,405	8,405	0,21	0,658	0,92
V	2	317,774	158,887	3,90	0,050	34,55
f	2	104,308	52,154	1,28	0,314	11,34
Error (e)	12	489,182	40,765			53,19
Total	17	919,669				100

Tablo 9’da kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkilerini gösteren varyans analizi sonuçları verilmiştir. Verilere uygulanan varyans analizi sonucunda kesici takım türü, kesme hızı ve ilerleme oranı kesme sıcaklığı değerlerine etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kesme sıcaklığına etki eden en etkili faktör %34,55 ile kesme hızı olmuştur. Özellikle kesme hızının kesme sıcaklığına etkisi literatürle örtüşmektedir. [26].

5.2. Kesme Parametrelerinin Etkilerinin Grafiklerle Değerlendirilmesi

Kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine olan etkilerinin değerlendirilmesinde üç boyutlu grafikler kullanılmıştır. Şekil 5’te kesici uçların, kesme hızı ve ilerlemenin, kesme sıcaklığına olan etkilerini gösteren grafik yer almaktadır.

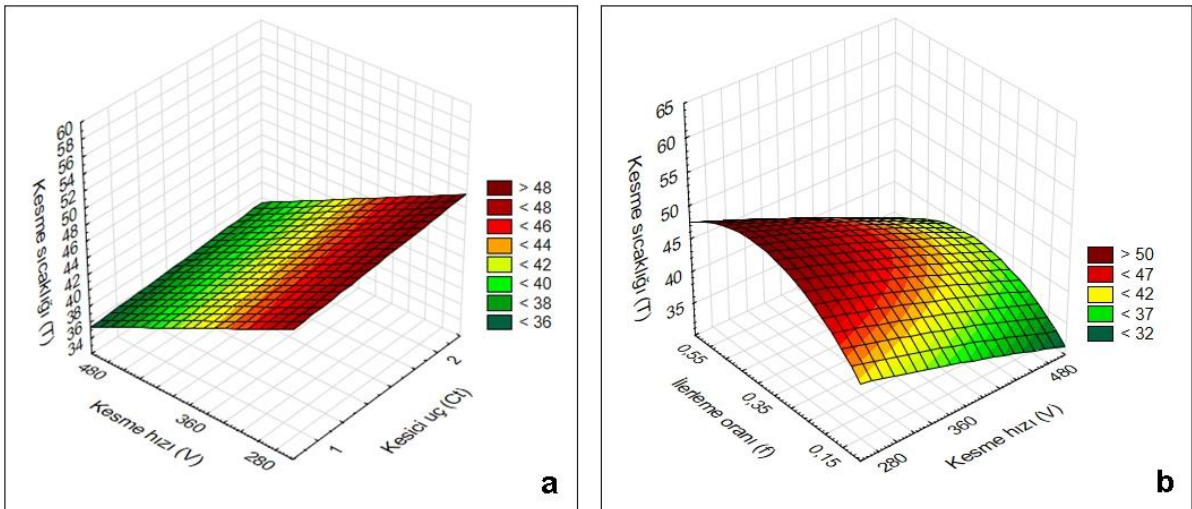
Şekil 5a’da kesici uç ve kesme hızının kesme sıcaklığına etkisini gösteren grafik yer almaktadır. Burada kesme hızı arttıkça sıcaklığın düştüğü görülmektedir. Bu durum kesici ucun daha hızlı hareket etmesi ve parça üzerine daha az sürtünme oluşturacağından, sıcaklığında düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 5a’da en düşük sıcaklık değerleri 480 m/dak kesme hızı ve kriyojenik işlem görmemiş kesici uçta olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi optimizasyonu ile benzerlik göstermektedir. Şekil 5b’de ilerleme ve kesme hızının sıcaklık üzerine etkilerini gösteren grafik yer almaktadır. Burada, ilerleme oranı arttıkça sıcaklığında arttığı görülmektedir. Şekil 5b’de en düşük sıcaklık değerlerinin 480 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme oranında olduğu görülmektedir. Bu durum da Taguchi optimizasyonu ile uyusmaktadır.

5.3. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları farklı algoritmaları, giriş verilerini ve bu verilere bağlı sonuçları kullanan etkin bir tahmin araçlarıdır. Bu çalışmada Taguchi tahmin denklemi ile kıyaslanarak yapay sinir ağının etkinliği test edilmiştir. Çalışmada beş farklı yapay sinir ağı modelleri denenerek en ideal sonuçlar bulunmaya çalışılmıştır. Burada en iyi sonucu; MLP ağı, 0,984 eğitim performansı, BFGS eğitim algoritması kullanan model vermiştir. Bu durum Şekil 5’te görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kaplamasız kriyojenik işlem görmüş kesici uç ve kaplamasız kriyojenik işlem görmemiş kesici uçlar, üç farklı ilerleme ve üç farklı kesme hızı kullanılarak GGG40 dökme demire yüzey frezeleme işlemi uygulanmıştır. Kriyojenik işlem farklı kesme şartlarında, farklı performans göstermektedir. Bu çalışmada ayrıca kriyojenik işlemin kesme sıcaklığına bağlı olarak nasıl bir performans sergilediğine bakılmıştır. Deneysel tasarım için Taguchi L18 ortogonal dizi kullanılarak 18 adet deney gerçekleştirilmiştir. Yürütülen deneylerde, kesme bölgesinden termal kamera ile sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sıcaklık değerleri için Taguchi tahmin denklemleri ve yapay sinir ağları algoritmaları kullanılarak tahmin değerleri elde edilmiştir. Ayrıca kesme parametrelerinin sıcaklıklara karşı etkileri de incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;



Şekil 5. Kesme parametreleri ve sıcaklık değerleri grafikleri

- Yapılan Taguchi optimizasyonunda kesme sıcaklıkları için optimum kombinasyon; kriyojenik işlem görmemiş kesici uç, 480 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme oranı olarak bulunmuştur.
- Gerek optimizasyon sonuçları gerekse grafikler değerlendirildiğinde kriyojenik işlem görmemiş kesici uçların daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Kriyojenik işlem görmüş malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksek sertlik ve tokluk değerlerine sahiptir. Genel olarak kriyojenik işlemlerde, daha yüksek sertlik değerlerinde elektriksel iletkenlik azalırken, malzemedeki bazı maddeler çözünmektedir. Bu çözümlerin kriyojenik işlem görmüş kesici uçların sıcaklık değerlerini arttırdığı bu çalışmada olduğu gibi daha düşük bir performans gösterdiği düşünülmektedir. [27, 28].
- Çalışmada, Taguchi ortalama tahmin hata değeri %10,34, yapay sinir ağı için ortalama tahmin hata değeri %6,45 olarak hesaplanmıştır. Taguchi tahmin değerleri eşitliğe göre hesaplanmaktadır. Bu durum tek bir algoritmayı içermektedir. Yapay sinir ağı modelinde parametre olarak birden fazla girdi ve algoritma bulunmaktadır. Bu nedenle daha hassas bir hesaplama söz konusudur. Bu durum Taguchi tahmininden daha iyi bir performansa yol açmıştır.
- Gerek Taguchi gerekse yapay sinir ağı algoritmaları ile elde edilen tahmin değerlerinde, deneysel değerlere en yakın tahmini, yapay sinir ağı algoritması vermiştir.
- Varyans analizi sonuçlarına göre sıcaklığa etki eden en etkili faktör kesme hızı olmuştur.
- Grafikler değerlendirildiğinde ilerleme oranı arttıkça sıcaklıkların arttığı, kesme hızı arttıkça da sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmüştür. Sıcaklık değerleri için en iyi performansı 0,15 mm/diş ilerleme, 480 m/dak kesme hızı ve kriyojenik işlem görmemiş kesici uç göstermiştir.
- Kriyojenik işlem görmüş kesici uçlarda yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

İş parçası üzerinden talaş kaldırırken, kesme kuvvetlerini oluşturmak için kullanılan enerjinin neredeyse tamamı ısı olarak dönüştürülür. Bu nedenle, kesme bölgesinde oluşan ısı, talaş kaldırma işleminde çok önemli bir rol oynar. Takım performansı ve iş parçası kalitesi, kesme bölgesinde

oluşan ısıya bağlıdır [29]. Çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, düşük sıcaklıklar için GGG40 dökme demire yüzey frezeleme işlemi uygulanırken kriyojenik işlem görmemiş kaplamasız kesici uç, 0,15 mm/diş ilerleme ve 480 m/dak kesme hızı kullanımı tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

Yazar tarafından herhangi bir destek beyan edilmemiştir.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

ESTIMATION OF CUTTING TEMPERATURE VALUES IN MILLING OF GGG40 CAST IRON WITH CRYOGENIC AND NON-CRYOGENIC TREATED CUTTING INSERTS USING TAGUCHI AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK ALGORITHMS AND INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS

GGG40 is the most widely used nodular cast iron alloy with a predominantly ferritic structure. This material has excellent machinability, good impact resistance, high electrical conductivity, elongation properties, and magnetic permeability. This extremely tough material makes it suitable for equipment subject to large forces. In this study, surface milling was applied to GGG40 cast iron using two cutting inserts (cryogenically treated and untreated, uncoated), three cutting speeds (280, 360, and 480 m/min), and three feeds (0.15, 0.35, and 0.55 mm/tooth). After the experiments, 3 seconds after the cutting tools began removing material, temperature measurements in the cutting zone were obtained using a thermal camera at approximately the midpoint of the workpiece. The Taguchi L18 orthogonal array was used in the experimental design, and 18 experiments were conducted. The temperature values obtained after the experiments were optimized, and the optimized values obtained were found to be a non-cryogenic treated cutting tip, 480 m/min cutting speed, and 0.15 mm/tooth feed rate. The predicted values for the experimental results were obtained using Taguchi prediction equations and artificial neural network algorithms. The Taguchi mean prediction error was 10.34%, and the artificial neural network's mean prediction error was 6.45%. In the variance analysis of the percentage of effect of the cutting parameters, the most effective parameter affecting temperature was cutting speed, with 34.55%. The study observed that the most practical cutting edge for the minimum temperature was the cutting edge that was not cryogenically treated.

Keywords: Taguchi, Artificial Neural Networks, Thermal Measurement, Cutting Temperature, GGG40

KAYNAKLAR

1. Cavallini M., Di Bartolomeo O., Iacoviello F. (2008). Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons, *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 694–704.
2. Çavuşoğlu E. N. (1992) Döküm Teknolojisi 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
3. Kalpakjian S., Schmid S. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology* (8th Edition), New York: Prentice Hall, USA.
4. Silman G.I., Kamynin V.V., Goncharov V.V. (2007). On the mechanisms of copper effect, *Metal Science and Heat Treatment*, 49(8): 16-22.
5. Uçun I., Aslantaş K. (2009). The performance of ceramic and cermet cutting tools for the machining of austempered ductile iron, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41: 642–650.
6. Dearnley P.A., (1985) A metallurgical evaluation of tool wear and chip formation when machining pearlitic grey cast irons with dissimilar graphite morphologies, *Wear*. 101 (1): 33–68, [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90210-8](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(85)90210-8).
7. Adır M. T. (2021) Isıl işlem yardımıyla mekanik özellikleri iyileştirilmiş GGG70 dökme demirin işlenebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
8. Koçak H., Uzun G. (2018). Investigation of cutting tool wears and cutting forces during wear in machining of ggg 90 ductile cast iron used as crank shaft, *International Conference Innovative Engineering Applications*, Sivas, Türkiye, 695-700.
9. Yan P. Wang Y. B., Chen K.J., Ma B.X., Xiao Y. L., Wang X.B. (2020) Experimental research on high-speed dry milling performance of large-area nodular cast iron, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 770 (012012): 1-8.
10. Da Silva A. E., Rabelo De Melo I.N., Pinheiro I.P., Da Silva L.R. (2020). Characterisation and machinability of high chromium hardened white cast iron with and without the addition of niobium, *Wear*, 460-461: 1- 16.
11. Da Silva L.R.R., Souza F.C.R., Guesser W.L., Jackson M.J., Machado A.R. (2020). Critical assessment of compacted graphite cast iron machinability in the milling process, *Journal of Manufacturing Processes*, 56 (A): 63-74.
12. Yang H.W., Wang X.M., Liu W., Huang W., Wu M., Xue M.L., Li L. (2024) Influence of distribution and size of graphite particle on the machinability of nodular cast iron, *Engineering Fracture Mechanics*, 297 (109882): 1-17.
13. Binali R., Kuntoğlu M. (2023) Evaluation of machining parameters affecting cutting forces in dry turning of ggg50 ductile cast iron, *Turkish Journal of Nature and Science*, 12(2): 55-60.
14. Lanc K., Fiala Z. And Zouhar J. (2024) Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133: 1129-1141.
15. <https://www.matweb.com/>
16. WIDIA, Master Catalogue, 2017 WIDIA.
17. P. Baldissera, C. Delprete (2008) Deep cryogenic treatment: A Bibliographic review, *The open mechanical engineering journal*, 2: 1-11.
18. Özbek N. A. (2020) Kaplamalı tungsten karbür takımlar üzerine uygulanan kriyojenik işlemin AISI H11 çeliğinin işlenebilirliği üzerine etkilerinin araştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8:1650-1660.
19. Korucu S. (2020) The effects of sharpened tools on tool flank wear-surface roughness and optimization of cutting parameters in milling Vanadis 4E powder metallurgical tool steel, *Sādhanā*, 45 (137): 1-13.
20. Samtaş, G., Korucu S. (2021) Multiple optimization of cutting parameters in milling of cryogenically treated Aluminium 6061-T651 alloy with cryogenic and normal cutting inserts, *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9(045003): 1-10.
21. Awasthi, P., Mao, A., Mohri, M., Mohri M., Zhong Y. (2024) DC-programming for neural network optimizations. *Journal of Global Optimization* 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10898-023-01344-2>
22. Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.E. (2012) Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1097–1105.

23. Sutskever, I., Vinyals, O., Le, Q.V. (2014) Sequence to sequence learning with neural networks. In: Advances in Neural Information Processing Systems, 3104–3112.
24. Shomope I., Tawalbeh M., Al-Othman A., Almomani F. (2025) Predicting biohydrogen production from dark fermentation of organic waste biomass using multilayer perceptron artificial neural network (MLP–ANN), Computers and Chemical Engineering, 192(108900): 1-11.
25. Wang Y., Zhou X. (2024) Predictive study of drying process for limonite pellets using MLP artificial neural network model, Powder Technology, 444(120026): 1-10.
26. Düzce R., Samtaş G. (2021) GG25 Dökme demirin frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkisi ve optimizasyonu, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 2(3): 20-33.
27. Zhirafar S (2005) Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of steel and aluminum alloys, Masters thesis, Concordia.
28. Gogte CL, Likhite A, Peshwe D, Bhokarikar A and Shetty R (2014) Effect of cryogenic processing on surface roughness of age hardenable AA6061 alloy, Materials and Manufacturing Processes, 29(6): 710-714.
29. Gökkaya H., Nalbant M., Şeker U. (2004) Talaş kaldırma sırasında açığa çıkan ısının kesme bölgesinde oluşturduğu sıcaklıkların ölçülmesinde kullanılan yöntemler, Politeknik Dergisi, 7 (4): 297-305.

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 tanıtıldığı 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 karşılaşırsanız İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Hakan Kalkan (hakan.kalkan@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirsiniz. 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 kullanmak 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.

Özette 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 tanıtılmalı, 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 verilmesine 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 satırdan 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 yazı ile 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 eşitliğin 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.