



Ekipmanlarda Ağırlık Hafifletilmesi ile Enerji Tüketimi ve Karbon Ayakizi Azaltımı

Energy Consumption and Carbon Footprint Reduction by Weight Reduction in Equipment

Özgür Yalçın 

TOYOTETSU Otomotiv Parçaları San. Ve Tic. A.Ş., Kocaeli, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: yalcino@toyotetsu.com.tr

Öz

Bu çalışmada, robotik üretim sistemlerinde kullanılan tutucu ekipmanların ağırlıklarının optimize edilerek enerji verimliliğine katkı sağlanması hedeflenmiştir. Seri üretimde kullanılan bir iş parçasına ait mevcut tutucu, daha hafif bir malzeme olan özel profille yeniden tasarlanmış ve Powerklemp sistemleriyle entegre edilerek kompakt bir yapı elde edilmiştir. Optimize edilen ve mevcut tutucu yapıları, aynı robot hücresinde 10'ar dakika çalıştırılarak enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, optimize tasarımın %28,5 oranında daha hafif olduğu ve yıllık bazda 923,1 kWh (%5,13) enerji tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Bu tasarruf, yaklaşık 0,408 ton karbon ayak izi azaltımına karşılık gelmektedir. Elde edilen bulgular, tutucu tasarımında yapılacak ağırlık azaltımının yalnızca mekanik avantaj değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli faydalar sunduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Robot Tutucu, Ağırlık Hafifletme, Karbon Ayak Izi, Enerji Tasarrufu

Abstract

This study aims to enhance energy efficiency in robotic production systems by optimizing the weight of gripper equipment. A conventional gripper used for a mass-production workpiece was redesigned using a lighter special-profile material and integrated with Powerklemp systems to achieve a compact structure. The optimized and original grippers were operated for 10 minutes each in the same robot cell, and their energy consumption was measured and compared. The results revealed that the optimized design achieved a 28.5% weight reduction, leading to an annual energy saving of 923.1 kWh (5.13%) and a reduction of approximately 0.408 tons in carbon footprint. The findings demonstrate that weight optimization in gripper design offers not only mechanical benefits but also significant contributions to environmental sustainability.

Keywords: Robot Gripper, Weight Lightening, Carbon Footprint, Energy Saving

1. Introduction

With the advent of technological advancements, traditional manufacturing structures have undergone a significant transformation. The concept of *Industry 4.0*, introduced in 2011 in Hannover, Germany, has led to the widespread adoption of digitalized production systems [1]. This paradigm shift aims to enhance global competitiveness, minimize production errors, and improve overall quality levels. In line with these objectives, substantial investments have been directed toward systems that incorporate human-robot collaboration [2]. As a result of these developments, it was reported that by 2021, approximately 3.5 million industrial robots were actively in operation worldwide [3].

Following the transition to automation in industry, the most common investment in production processes has been in six-axis robots due to their flexibility and high payload capacities. As a result of these investments, production efficiency has increased by approximately 20–25% over the past decade [5][6]. However, this growth has also led to a rise in energy consumption within factories [7]. Unlike conventional mechanical systems, the power consumption of six-axis robots is dynamic; the energy used is

primarily dependent on the minimum torque required to maintain the position of the motors in each axis [8]. For instance, a robot with a 200 kg payload capacity may consume 0.5 kW in standby mode and up to 20 kW during operation. This high consumption poses a significant issue in terms of energy efficiency and sustainability [6].

Currently, about 42% of total electricity consumption in industrial facilities originates from production processes, contributing negatively to global warming [9]. In the automotive industry—one of the most energy-intensive sectors—it has been reported that 15–28% of total energy consumption comes from production equipment, with 8% directly attributable to robotic systems [5][10]. In response, the European Union set a target in 2020 to achieve a 20% energy saving based on 2007 data and mandated energy efficiency practices in production processes [8]. While robot manufacturers have focused on improving the precision and speed of these systems, they have also conducted studies to reduce energy consumption in alignment with EU energy policies. Although optimization of robot software and parameter settings has been attempted, such approaches have yielded only limited success [6]. Consequently, factories have

begun adopting alternative strategies aimed at reducing energy consumption by lowering the weight of equipment that directly impacts the robot [11].

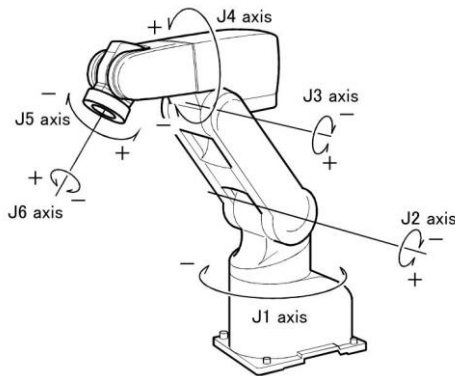


Figure 1. Axis configuration of a 6-axis robot. [4]

Since every piece of equipment connected to the sixth axis of a robot directly affects energy consumption—such as grippers, spot welding guns, and paint spray guns—research has focused on optimizing their design and material selection [5][7][12][13]. Given that welding and painting equipment is often already optimized, the potential for further improvement in these components is limited. However, gripper systems, which are custom-designed for each workpiece, offer significant design flexibility and weight reduction potential [14]. As these grippers are typically integrated with robots, their weight becomes a decisive factor in both robot selection and energy consumption [15][16]. Lighter and more compact designs allow the use of robots with lower payload capacities, which in turn leads to reduced energy consumption.

Grippers typically consist of mechanical, pneumatic/hydraulic, or electric components, with mechanical components comprising approximately 90% of the systems. The shapes and material choices of mechanical components play a critical role in determining overall weight. In addition to shape optimization, recent developments have introduced many alternative materials (e.g., composites, 3D printing materials) and manufacturing methods to support material selection optimization. These new-generation equipment solutions and advancements in material technologies have significantly increased the potential for reducing the weight of payload-bearing components used in robotic systems. This not only reduces costs but also leads to notable energy savings [14][17].

In this study, an existing gripper designed for a mass production workpiece was redesigned using lightweight materials, alternative components, and structural optimization. Both the original and the optimized grippers were operated in the same robotic cell for 10-minute intervals, and their energy consumption was compared. Data collected using a specialized measurement device were analyzed to evaluate the impact of weight differences on energy consumption.

2. Materials and Methods

In this study, a structural optimization was carried out to reduce the weight of an industrial robot gripper used in automotive mass production lines by incorporating alternative components and assembly configurations. At the beginning of the study, the existing gripper—constructed from ST37 material with a box profile structure—was taken as a reference.

Alternative profile geometries and materials commonly used in industrial applications were selected and evaluated through:

- Weight comparison,
- Moment of inertia analysis (I_x and I_y),
- Stress analysis along the X and Y axes.

Based on the comparative results, a suitable profile was selected and a new design was developed.

In the new design, both the original and the optimized grippers were mounted on the same robot within the same production cell and operated for 10 minutes each under identical cycle conditions at 90% operational speed. During this process, real-time energy consumption was recorded using a three-phase power and energy analyzer. Parameters such as voltage, current, and phase angle were monitored with a $\pm 1\%$ tolerance during the measurements.

Based on the obtained data, the energy consumption of both grippers was calculated in kilowatt-hours (kWh), the difference between them was determined, and the percentage of energy savings per hour was presented. Through this method, the impact of weight reduction on energy efficiency was analyzed in a direct and comparative manner.

Additionally, in this section, the mechanical properties of the profiles used—such as weight, moments of inertia, displacement, and stress values—were evaluated via static load analyses in a CAD environment. The advantages of the selected special profile in terms of rigidity, assembly reliability, and uniform deformation behavior were also demonstrated.

2.1. Alternative Material and Equipment Research

In order to achieve energy savings through weight reduction, a literature review and market analysis were conducted to identify both the currently used equipment and potential alternative structural solutions. These investigations are essential for understanding the limitations of the existing system and identifying areas open to optimization. Robot gripper structures must be designed to be flexible and adaptable to the geometry and characteristics of the workpieces they handle [18]. Flexibility is a key design criterion that enables rapid adaptation to various production scenarios [13], [15]. In this study, the weight of the workpiece to be transported was set at 20 kg.

In recent years, with advancements in manufacturing technologies, innovative solutions such as pneumatic manipulators, finger-type grippers, magnetic systems, 3D-printed components, and composite materials have come to the forefront [12], [19], [20]. However, in this study, to ensure both risk minimization and practical applicability, two standardized alternative profiles—capable of directly replacing conventional systems—were selected for evaluation [16].

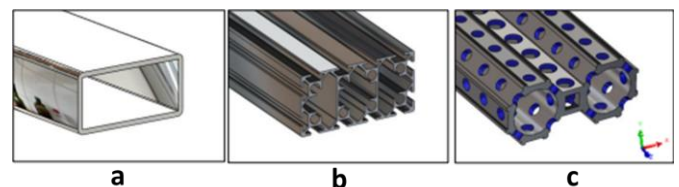


Figure 2. ST37 Box profile (a) (current), and selected alternatives: sigma profile (b), custom Profile (c).

In the selection of alternative profiles, factors such as manufacturability, availability, durability, and compatibility with the existing system were taken into consideration. Accordingly,

two alternatives were evaluated: a commercially available sigma profile made of 6063-T6 aluminum alloy, and a custom-designed profile produced by a specific manufacturer using 6063-T66 alloy. Each profile was modeled with a length of 770 mm and a cross-section of 40×120 mm. The wall thicknesses were set as follows: ST37 (t = 5 mm), sigma profile (t = 4 mm), and custom profile (t = 5 mm).



Figure 3. Weight comparison of profile types (770 × 40 × 120 mm).

In this study, which focuses on weight reduction, two selected alternative profile types were compared with the ST37 box profile. Mass analysis conducted for profiles with a length of 770 mm and a cross-section of 40 × 120 mm revealed that the sigma profile is approximately 80% lighter, while the custom profile is about 47% lighter than the ST37 box profile.

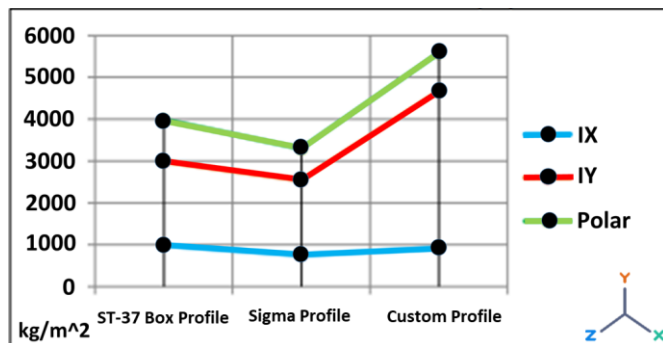


Figure 4. Moment of inertia of profile cross-sections.

As shown in Figure 4, the numerical analysis of the moment of inertia values for each profile yielded the following results:

- I_x (mm⁴): Box Profile ≈ 900 mm⁴, Sigma Profile ≈ 700 mm⁴, Custom Profile ≈ 850 mm⁴
- I_y (mm⁴): Box Profile ≈ 3000 mm⁴, Sigma Profile ≈ 2500 mm⁴, Custom Profile ≈ 4500 mm⁴
- Polar Moment (J, mm⁴): Box Profile ≈ 4000 mm⁴, Sigma Profile ≈ 3300 mm⁴, Custom Profile ≈ 5500 mm⁴

Based on these values, the custom profile exhibits rigidity comparable to the box profile along the X-axis, while providing approximately 50% greater rigidity along the Y-axis. Its significantly higher polar moment also indicates a notable structural advantage. This suggests that the custom profile offers a more stable and durable structure under dynamic loading conditions.

Given that the weight of the workpiece to be carried in this study was defined as 20 kg, each profile was subjected to a structural analysis in a CAD environment under a constant load of 20 kg. The stress and displacement analyses of the profiles under this load, applied along the Y-axis, are presented in Figure 5.

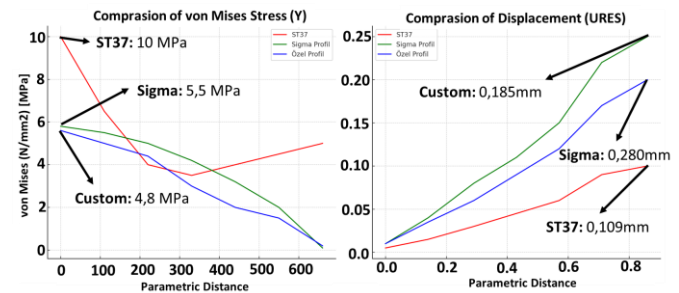


Figure 5. Stress (left) and displacement (right) analyses of profiles along the Y-axis.

Table 1. Summary of Y-axis stress and displacement values presented in figure 5.

Equipment	Y Axis Stress (Mpa)	Displacement (mm)
ST37 Box Profile	10,0	0,109
Sigma Profile	5,5	0,280
Custom Profile	4,8	0,185

The mechanical responses of the profiles under a 20 kg load applied along the Y-axis were evaluated as follows:

- ST37 Box Profile: Maximum stress ≈ 10 MPa, maximum displacement ≈ 0.109 mm
- Sigma Profile: Maximum stress ≈ 5.5 MPa, maximum displacement ≈ 0.28 mm
- Custom Profile: Maximum stress ≈ 4.8 MPa, maximum displacement ≈ 0.185 mm

These results indicate that the sigma profile, due to its lower moment of inertia, exhibits higher stress and deflection values. In particular, the maximum displacement of 0.28 mm reveals its structural weakness in terms of rigidity. In contrast, the custom profile demonstrates a more balanced and rigid behavior in terms of both stress and displacement. Such performance under a 20 kg load highlights its suitability for heavy-duty operating conditions.

Similar analyses were also conducted along the X-axis, and the results are presented in Figure 6.

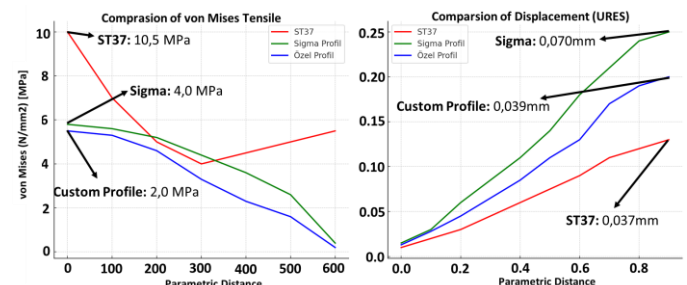


Figure 6. Stress (top) and displacement (bottom) analyses of profiles along the X-axis.

Table 2. Summary of X-axis stress and displacement values presented in figure 6.

Equipment	X Axis Stress (Mpa)	Displacement (mm)
ST37 Box Profile	10,5	0,037
Sigma Profile	4,0	0,070
Custom Profile	2,0	0,039

Stress and displacement analyses of the profiles subjected to a 20 kg load along the X-axis are presented in Figure 6. The findings are as follows:

- ST37 Profile: Exhibited high rigidity with a maximum stress of approximately 10.5 MPa and a maximum displacement of 0.037 mm.
- Sigma Profile: Reached a maximum stress of 4.0 MPa and a displacement of approximately 0.070 mm, indicating low rigidity and a higher tendency for deformation.
- Custom Profile: Demonstrated both low deformation and high strength, with a maximum stress of around 2.0 MPa and a displacement of 0.039 mm.

These results show that the custom profile delivers the best performance along the X-axis in terms of both stress and displacement. The sigma profile, when compared to the ST37 and custom profiles, displays significantly greater deformation and lower strength, suggesting inadequate performance under heavy load conditions. Conversely, the custom profile stands out as a technically ideal solution for the optimized gripper due to its low stress, minimal displacement, and structural stability under X-directional loading.

In addition to its weight advantage, the custom profile was selected based on structural analysis results, ease of assembly, and long-term stability. Sigma profiles, due to their open channel structure, pose a risk of loosening and positional deviation at connection points, especially in applications requiring precise positioning. This issue is supported by findings in the literature and technical specifications provided by manufacturers [16]. On the other hand, the custom profile (6063-T66), equipped with integrated channel holes, offers precise positioning and better connection stability in high-strength applications [19]. Based on these assessments, the custom profile made from 6063-T66 aluminum alloy was identified as the most suitable structural element for the optimized gripper design, owing to its low mass, high rigidity, and stable assembly capability. This selection forms a solid foundation for enhancing energy efficiency and operational stability in robotic systems.

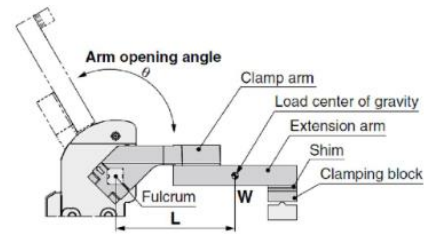
2.2. Structural Optimization of the Gripper and Equipment Integration

The analysis led to the selection of a proprietary 6063-T66 aluminum profile with integrated mounting holes, meeting requirements for flexibility, lightness, and durability. As the gripper's structural frame, all components must be compatible with this new system. The design was shaped by the size, type, and placement of electrical and pneumatic equipment.

Initially considered conventional Asian-type pneumatic cylinders were dismissed due to their bulky, complex structure and poor adaptability. Instead, Powerklem systems were chosen for their compactness and integration ease.

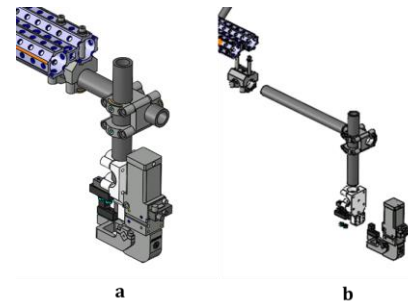
Powerklem clamping systems, essential for securing workpieces, are widely used in BIW automotive processes for

their efficiency, rigidity, and precise positioning in welding fixtures [21].

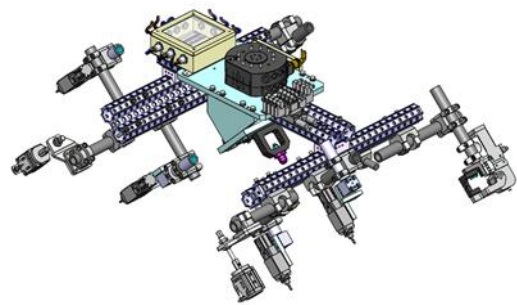
**Figure 7.** Sample components of powerklem systems.

Market analysis shows that Powerklem systems share similar working principles and external dimensions [17]. As shown in Figure 8, a gripper assembly was created using a standard profile and components like a power clamp, adjustment spindle, spindle retainer, and profile bracket, along with an integrated cylinder.

In this setup, the angle-adjustable cylinder secures the workpiece, while the pin-type clamping cylinder handles both centering and clamping, enhancing the system's compact and lightweight design.

**Figure 8.** Integration of the powerklem mechanism into the design.

Using these innovative components, a new gripper with a compact and flexible assembly layout was developed. This design reduced weight by 28.5% compared to the original, enhancing energy efficiency. The optimized gripper, based on the configuration in Figure 8, is shown in Figure 9.

**Figure 9.** Optimized gripper structure with custom profile.

In robotic systems, the ratio between payload force and equipment weight plays a critical role in energy management. A lighter end-effector reduces the power required for robotic motion, thereby contributing significantly to energy savings [7].

2.3. Measurement Modeling

Following the fabrication of the new gripper, its impact on energy consumption was evaluated through measurements and simulations. Parameters such as force, travel distance, torque, angular velocity, and operation time are directly influenced by

gripper weight, making weight reduction key to energy savings [11].

Accurate analysis of robotic energy use is essential to identify optimization opportunities. While no specific standard exists for robot energy performance, ISO 50001 can serve as a general reference [22].

For comparison, both grippers were operated for 10 minutes under identical conditions. A $\pm 1\%$ tolerance energy analyzer measured voltage, current, and phase angle directly from the robot unit, allowing precise evaluation of the optimization's energy impact.

2.4. Measurement with Power Quality & Energy Analyzer and Data Analysis in a Computer Environment

In this factory-based study, a FLUKE three-phase power analyzer was connected to the robot control panel to measure energy consumption. Over a 10-minute period, energy use was recorded for both the current and optimized grippers, reflecting a 27-kilogram weight difference.

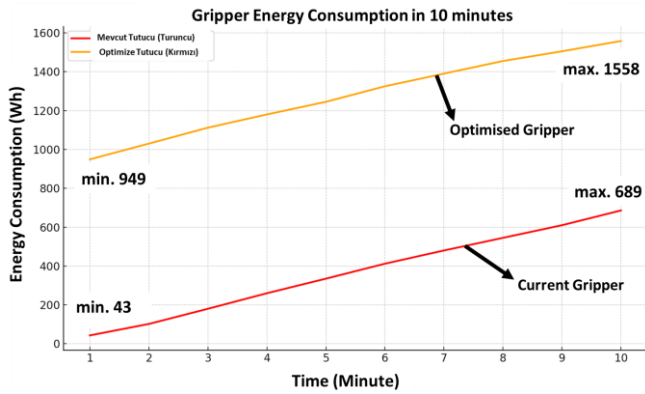


Figure 10. Energy consumption figure of grippers manufactured with box profile (Red) and custom profile (Orange).

To compare energy performance, both grippers were operated on the same robot under identical conditions for 10 minutes. The analyzer was directly connected to the robot control panel to ensure clean, interference-free data.

While initial values varied due to continuous logging, only the incremental energy consumption during the test period was used for comparison.

As shown in the figure:

- The existing gripper (red line) exhibited energy consumption in the range of 43 Wh to 689 Wh during the 10-minute test period.
- The optimized gripper (orange line), under the same conditions, consumed energy in the range of 949 Wh to 1558 Wh.

To calculate the average energy consumption, the difference between the maximum and minimum values is taken. Using this method:

For the existing gripper manufactured with a box profile:

$$\begin{aligned} E (\text{Average Energy Consumption}) &= E_{\max} - E_{\min} \\ &= (689 - 43)Wh \\ &= 646 Wh \end{aligned}$$

An average energy consumption of 646 Wh was observed during 10 minutes of operation.

For the optimized gripper:

$$\begin{aligned} E (\text{Average Energy Consumption}) &= E_{\max} - E_{\min} \\ &= (1558 - 949)Wh \\ &= 609 Wh \end{aligned}$$

An average energy consumption of 609 Wh was recorded during the same 10-minute operation period.

Based on these values, the hourly, daily (2 shifts), weekly, and annual energy consumption projections are presented in Table 3.

Table 3. Time-based average energy consumption (kWh) and difference.

Time	Current Gripper	Optimised Gripper	Difference
10 minutes	0,646	0,609	0,037
1 Hour	3,876	3,654	0,222
2 Shifts (16 hours)	62,016	58,464	3,552
1 Week	372,096	350,784	21,312
1 Month	1488,4	1403,1	85,3
1 Year	17860,6	16937,5	923,1

According to Table 3, scaling the 10-minute energy data to annual use shows that the optimized gripper provides a significant saving of 923.1 kWh per year, demonstrating its energy efficiency.

This difference, applicable in real production, highlights the potential for lower energy costs and reduced carbon footprint. The results confirm that the optimization brings both structural and operational benefits.

3. Findings and Discussion

This study achieved a 27 kg weight reduction in the gripper design by using alternative components and flexible assembly methods. This not only improved mechanical performance but also reduced the robot's energy consumption by lowering the required movement power.

As shown in Figure 11, the optimized gripper's annual energy use is significantly lower than that of the existing design.

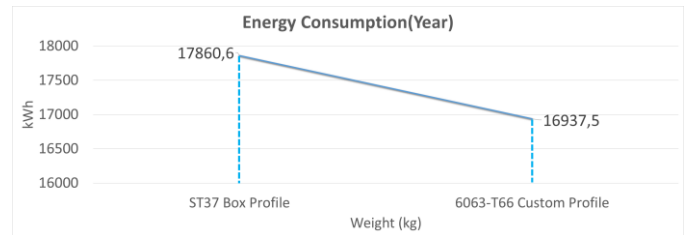


Figure 11. Weight-energy consumption relationship (Annual).

Reducing the gripper's weight led to a significant drop in the robot's energy use, resulting in an annual saving of 923.1 kWh per robot. This directly reduces carbon emissions and environmental impact [16].

Based on data from the Ministry of Energy, the carbon emission factor is 0.442 tons of CO₂ per 1 MWh of electricity consumed [23].

$$\begin{aligned} CO_2 \text{ Footprint} &= \frac{(\text{Energy Saving}) \times 0,442 \frac{kg}{kWh}}{1000} \\ CO_2 \text{ Footprint} &= \frac{923,1 \times 0,442 \frac{kg}{kWh}}{1000} \\ CO_2 \text{ Footprint} &= 0,408 kg[23] \end{aligned}$$

A 0.408-ton CO₂ reduction was achieved per robot. To evaluate this saving in terms of percentage, the difference between the maximum and minimum values measured from the energy consumption curve was divided by the maximum value, and the calculation was performed as shown in Equation 1:

$$E_{average} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max}} \times 100$$

$$E_{average} = \frac{17860,6 - 16937,5}{17860,6} \times 100$$

$$E_{average} = \frac{923,1}{17860,6} \times 100$$

$$E_{average} = \%5,13$$

Normalizing the difference shows that a 27 kg weight reduction yields an annual energy saving of 923.1 kWh approximately a 5.13% gain. This optimized gripper design supports both

industrial efficiency and sustainability goals by improving energy and environmental performance.

Conclusion

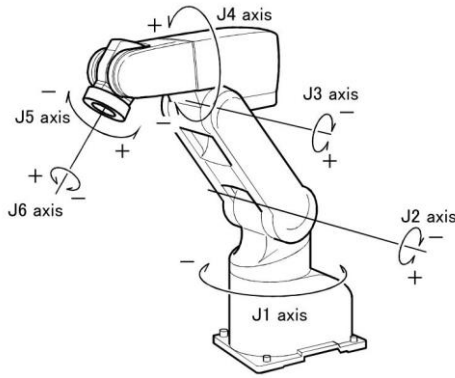
This study analyzed the energy savings from optimizing gripper structures in welding fixtures. The newly designed gripper, using a custom profile and Powerklemp systems, reduced weight by 28.5%. Measurements showed this led to an annual energy saving of 923.1 kWh per robot (5.13%) and a 0.408-ton reduction in carbon emissions.

The findings confirm that reducing equipment weight improves energy efficiency in robotic systems. Scaled to factory level, this approach offers significant energy and emission savings. Additionally, future use of alternative materials may further enhance system-wide efficiency.

Overall, the study highlights that energy-focused mechanical design can support sustainable and eco-friendly manufacturing.

1. Giriş

Teknolojik gelişmelerle birlikte geleneksel üretim yapıları dönüşüme uğramış, 2011 yılında Almanya'nın Hannover kentinde tanıtılan "Endüstri 4.0" kavramı ile dijitalleşen üretim sistemleri yaygınlaşmıştır [1]. Endüstri 4.0 yaklaşımı ile birlikte rekabet gücünün artırılması, üretim hatalarının azaltılması ve kalite seviyesinin yükseltilmesi hedeflenmiş, buna paralel olarak robot-insan iş birliği içeren sistemlere önemli yatırımlar yapılmıştır [2]. Bu yatırımlar ile 2021 yılı itibarıyla dünya genelinde yaklaşık 3.5 milyon endüstriyel robotun aktif olarak kullanıldığı bildirilmiştir [3].



Şekil 1. 6 Eksenli bir robotun eksenlerinin konumu. [4]

Figure 1. Axis configuration of a 6-axis robot. [4]

Endüstride otomasyon dönemine geçildikten sonra üretim süreçlerinde en yaygın yapılan yatırım esneklik ve yüksek taşıma kapasiteleri nedeniyle altı eksenli serbestlik derecesine sahip robotlardır. Bu yatırımların sonucunda üretim verimliliği son 10 yıl içerisinde %20–25 oranında artış göstermiştir [5] [6]. Ancak buna bağlı olarak fabrikalardaki enerji tüketimi de yükselmiştir [7]. 6 eksenli robotların güç tüketimi, klasik makine sistemlerinden farklı olarak dinamik olup kullanılan enerji, her eksenin yer alan motorların pozisyonlarını korumak için gerekli minimum torka bağlıdır [8]. Örneğin, 200 kg taşıma kapasitesine sahip bir robot bekleme anında 0.5 kW, çalışma anında ise 20 kW'a kadar enerji tüketebilmektedir. Bu yüksek tüketim, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır. [6]

Günümüzde sanayi tesislerinde toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %42'si üretim süreçlerinden kaynaklanmaktadır ve bu durum küresel ısınmaya da olumsuz yönde katkı sunmaktadır [9]. Özellikle enerji yoğun sektörlerden biri olan otomotiv sanayisinde, üretim süreçlerindeki toplam enerji tüketiminin %15–28'i üretim ekipmanlarından, %8'i ise doğrudan robotik sistemlerden kaynaklandığı raporlanmıştır [5][10]. Bu çerçevede Avrupa Birliği, 2020 yılı itibarıyla 2007 verilerini baz alarak %20 enerji tasarrufu hedefi belirlemiş ve üretim süreçlerinde enerji verimliliği uygulamalarını zorunlu kılmıştır. [8] Robot üreticileri, bu sistemlerin hassasiyetini ve hızını artırmakla birlikte, enerji tüketimini Avrupa Birliği enerji politikalarına uygun şekilde azaltmayı hedefleyen çalışmalar yürütmektedir ancak enerji tüketimini azaltmak için robot yazılımları ve parametre ayarlarında optimizasyonlar gerçekleştirirse de bu yöntemler sınırlı etki sağlamaktadır. [6] Bu nedenle fabrikalar, doğrudan robota etki sağlayan ekipmanların ağırlıklarını azaltarak enerji tüketimini düşürmeyi amaçlayan alternatif stratejilere yönelmiştir [11].

Robotların 6. eksenlerine bağlanan her bir ekipman enerji tüketimine doğrudan etki ettiğinden dolayı ilgili ekipmanlar, örneğin tutucu (gripper), spot kaynağı/boya tabancaları vb., tasarımsal ve malzemeleri olarak optimal hale getirilmesi üzerine çalışmalarda bulunmaktadır.[5][7][12][13]. Kaynak/boya tabancalarının çoğunlukla optimize edilmiş yapıda olması nedeniyle bu ekipmanlarda sağlanabilecek fayda sınırlıdır. Ancak her iş parçasına özel olarak tasarlanan tutucu sistemler, geniş bir tasarım çeşitliliği ve ağırlık azaltımı potansiyeli sunmaktadır [14]. Bu tutucular genellikle robotlara entegre çalışmaları için, ağırlıkları doğrudan hem robot seçiminde hem de enerji tüketiminde belirleyici bir faktördür [15][16]. Daha hafif ve kompakt tasarımlar, daha düşük taşıma kapasiteli robotların kullanılmasını mümkün kılmakta, bu da dolaylı olarak enerji tüketimini azaltmaktadır.

Tutucu (gripper)'lar mekanik, pnömatik/hidrolik/elektrik ekipmanlardan oluşan bir yapı olmakta ve %90'lık çoğunluk mekanik ekipmanlara aittir. Mekanik ekipmanların şekilleri, üretilecekleri malzeme seçimleri ağırlıklarında etkin rol oynamaktadır. Yapılacak olan şekil optimizasyonu dışında malzeme seçiminde de optimizasyon çalışmalarına katkı sağlamak adına günümüzde birçok alternatif malzemeler (kompozit, 3D baskı malzemeleri vb.) ve alternatif üretim yöntemleri ortaya çıkmıştır. Alternatif üretim yöntemleri, yeni nesil ekipman çözümleri ve malzeme teknolojilerindeki

gelişmeler, robot sistemlerinde kullanılan taşıyıcı ekipmanların ağırlıklarını azaltma potansiyelini artırmıştır. Bu durum yalnızca maliyet düşüşü sağlamamakta, aynı zamanda enerji tasarrufunu da beraberinde getirmektedir [14][17].

Bu çalışmada, seri üretimde kullanılan bir iş parçası için tasarlanmış mevcut bir tutucu, hafif malzeme ile alternatif ekipman kullanımı ve yapısal optimizasyon yoluyla yeniden tasarlanmıştır. Optimize edilen tutucu ile mevcut tutucu aynı robot hücresinde 10'ar dakika süreyle çalıştırılmış ve enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Özel ölçüm cihazı ile elde edilen veriler analiz edilerek, ağırlık farkının enerji tüketimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, otomotiv sektöründeki seri üretim hatlarında kullanılan endüstriyel robot tutucu ekipmanının ağırlığının hafifletilmesi amacıyla alternatif ekipman ve montaj içeriği ile yapısal bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın başlangıcında, mevcut sistemde kullanılan ST37 malzemeden imal edilmiş kutu profil yapıları referans olarak alınmıştır. Endüstriyel anlamda kullanılan ve alternatif olabilecek profil yapıları ve malzemeler seçilerek,

- Ağırlıkları
- I_x ve I_y atalet momentleri analizleri
- X ve Y eksenlerinde gerilme analizleri

yapılarak mevcut ile karşılaştırılma sonuçları değerlendirilmiş ve uygun görülen profil seçilerek yeni bir tasarım ortaya çıkartılmıştır.

Yeni tasarımda, sağlanan ağırlık azaltımı ile her iki tutucu (mevcut ve optimize edilen) aynı üretim hücresinde, aynı robota bağlanarak, %90 hızda ve aynı çevrim koşulları altında 10'ar dakika boyunca çalıştırılmıştır. Bu süreçte, üç fazlı güç ve enerji analizatörü kullanılarak anlık enerji tüketimleri kaydedilmiştir. Ölçümler sırasında gerilim, akım ve faz açısı gibi parametreler %1 toleransla izlenmiştir.

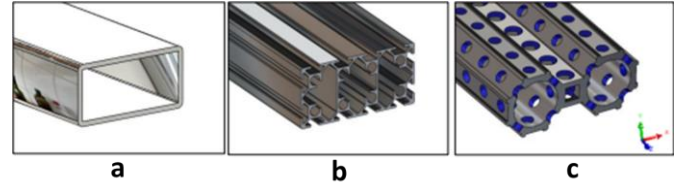
Elde edilen veriler doğrultusunda her iki tutucunun enerji tüketimleri kilowatt-saat (kWh) cinsinden hesaplanmış, aralarındaki fark belirlenmiş ve saatlik bazda yüzde tasarruf oranı ortaya konmuştur. Bu yöntemle, ekipman hafifletmesinin enerji verimliliği üzerindeki etkisi doğrudan karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu bölümde ayrıca, kullanılan profillerin mekanik özellikleri (ağırlık, atalet momentleri, yer değiştirme ve gerilme değerleri) CAD ortamında statik yük analizleri ile değerlendirilmiş ve tercih edilen özel profilin rijitlik, montaj güvenliği ve homojen deformasyon davranışları açısından avantajları ortaya konmuştur.

2.1. Alternatif Profil Yapılarının Seçimi ve Mekanik Performans Analizi

Enerji tasarrufu sağlamak amacıyla ağırlık hafifletmeye yönelik olarak mevcutta kullanılan ekipmanlar ve bu ekipmanlara alternatif olabilecek yapıların tespiti amacıyla literatür ve piyasa araştırması gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar, mevcut sistemin sınırlarını ve optimizasyona açık alanları belirlemek açısından önemlidir. Robot tutucu yapıları, taşınacak parçaların geometri ve özelliklerine uygun olarak esnek ve uyarlanabilir olacak şekilde tasarlanmalıdır [18]. Esneklik, farklı üretim senaryolarına hızlı adaptasyonu kolaylaştıran temel bir tasarım kriteridir [13], [15]. Bu çalışmada taşınacak iş parçası ağırlığı 20 kg olarak belirlenmiştir.

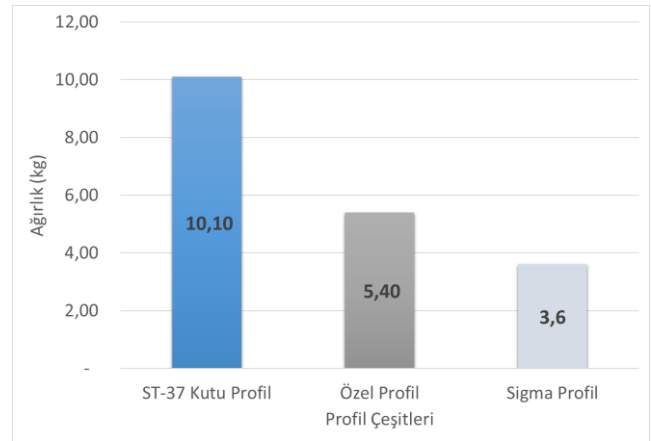
Son yıllarda gelişen üretim teknolojileriyle birlikte pnömatrik manipulatörler, parmak yapıda tutucular, mıknatıslı sistemler, 3D yazıcıdan üretilen parçalar ve kompozit malzemeler gibi yenilikçi çözümler öne çıkmaktadır [12], [19], [20]. Ancak, bu çalışmada risk azaltımı ve uygulanabilirlik adına klasik sistemlerin yerine doğrudan geçebilecek, piyasada standartlaşmış iki alternatif profil değerlendirmeye alınmıştır [16].



Şekil 2. ST37 Kutu profil (a) (mevcut) ve alternatif olarak seçilen sigma profil (b), özel profil (c).

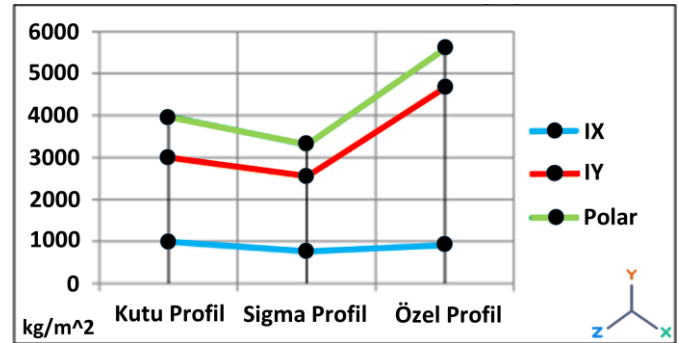
Figure 2. ST37 Box Profile (a) (current), and selected alternatives: sigma profile (b), custom profile (c).

Alternatif profillerin seçiminde üretilebilirlik, erişilebilirlik, dayanıklılık ve mevcut sistemle entegrasyon kabiliyeti dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, piyasada yaygın olarak bulunan 6063-T5 alaşımlı sigma profil ile bir üretici firmaya özgü olan ve 6063-T66 alaşımıyla üretilmiş özel profil değerlendirmeye alınmıştır. Her bir profil, 770 mm uzunlukta ve 40x120 mm kesitte modellenmiş; et kalınlıkları sırasıyla ST37 (t=5 mm), sigma (t=4 mm) ve özel profil (t=5 mm) olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3. Profil çeşitlerinin ağırlık karşılaştırması (770x40x120mm ölçülerinde)

Figure 3. Weight comparison of profile types (770 × 40 × 120 mm).



Şekil 4. Profil kesit atalet momentleri

Figure 4. Moment of inertia of profile cross-sections.

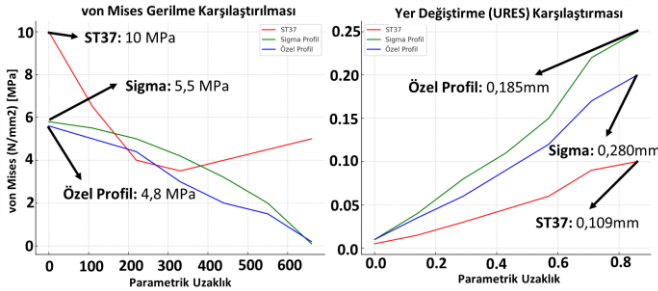
Ağırlık hafifletme amacı ile yapılan bu çalışmada seçilen alternatif 2 profil türü ST-37 Kutu profil ile karşılaştırılmıştır. 770mm uzunlukta ve 40x120mm kesite sahip profiller için yapılan kütle analizlerinde sigma profilin %80, özel profilin ise %47 oranında daha hafif olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4'de profillerin atalet momenti değerleri sayısal olarak incelendiğinde:

- I_x (mm^4): Kutu Profil $\approx 900 \text{ mm}^4$, Sigma Profil $\approx 700 \text{ mm}^4$, Özel Profil $\approx 850 \text{ mm}^4$
- I_y (mm^4): Kutu Profil $\approx 3000 \text{ mm}^4$, Sigma Profil $\approx 2500 \text{ mm}^4$, Özel Profil $\approx 4500 \text{ mm}^4$
- Polar Moment (J , mm^4): Kutu Profil $\approx 4000 \text{ mm}^4$, Sigma Profil $\approx 3300 \text{ mm}^4$, Özel Profil $\approx 5500 \text{ mm}^4$

Bu değerler ışığında özel profilin X ekseninde kutu profile yakın bir rijitlik sunduğu, Y ekseninde ise yaklaşık %50 oranında daha yüksek rijitlik sağladığı görülmektedir. Polar moment açısından da özel profilin belirgin üstünlüğü dikkat çekmektedir. Bu durum, dinamik yüklemelere karşı daha stabil ve uzun ömürlü bir yapı sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada taşınacak iş parçası ağırlığı 20 kg olarak belirlendiğinden dolayı CAD ortamında her profil, 20 kg'lık sabit yüke maruz bırakılarak yapısal analizlere tabi tutulmuştur. Y ekseninde 20 kg yüke maruz bırakılan profillerin gerilme ve yer değiştirme analizleri Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Y ekseninde profil gerilme (sol) ve yer değiştirme (sağ) analizleri.

Figure 5. Stress (left) and displacement (right) analyses of profiles along the Y-axis.

Tablo 1. Şekil 5'teki Y eksen gerilme ve yer değiştirme değerlerin özeti.

Table 1. Summary of Y-axis stress and displacement values presented in Figure 5.

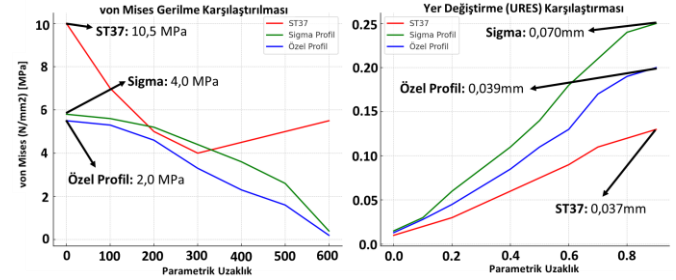
Ekipman	Y Gerilme(Mpa)	Yer değiştirme (mm)
ST37 Kutu Profil	10,0	0,109
Sigma Profil	5,5	0,280
Özel Profil	4,8	0,185

20 kg'lık yük altında profillerin Y eksenindeki mekanik tepkileri değerlendirildiğinde;

- ST37 Kutu Profil: Maksimum gerilme değeri $\approx 10 \text{ MPa}$, maksimum yer değiştirme $\approx 0.109 \text{ mm}$
- Sigma Profil: Maksimum gerilme değeri $\approx 5.5 \text{ MPa}$, maksimum yer değiştirme $\approx 0.28 \text{ mm}$
- Özel Profil: Maksimum gerilme $\approx 4.8 \text{ MPa}$, maksimum yer değiştirme $\approx 0.185 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür.

Bu veriler, sigma profilin düşük atalet momenti nedeniyle yüksek gerilme ve sapma değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 0.28 mm'lik maksimum yer değiştirme, rijitlik açısından zayıflığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık özel profil, hem gerilme hem de yer değiştirme açısından daha dengeli ve rijit bir yapı sergilemektedir. 20 kg'lık yük altında bu düzeyde bir performans, ağır çalışma koşullarına uygunluk bakımından avantaj sağlamaktadır.

Benzer analizler X ekseninde de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. X ekseninde profil gerilme (üst) ve yer değiştirme (alt) analizleri.

Figure 6. Stress (top) and displacement (bottom) analyses of profiles along the X-axis.

Tablo 2. Şekil 6'daki X eksen gerilme ve yer değiştirme değerlerinin özeti.

Table 2. Summary of X-axis stress and displacement values presented in Figure 6.

Ekipman	X Gerilme(Mpa)	Yer değiştirme (mm)
ST37 Kutu Profil	10,5	0,037
Sigma Profil	4,0	0,070
Özel Profil	2,0	0,039

X ekseninde 20 kg yüke maruz bırakılan profillerin gerilme ve yer değiştirme analizleri Şekil 6'da sunulmuştur. Elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

- ST37 Profil: Yaklaşık 10.5 MPa maksimum gerilme ve 0.037 mm maksimum yer değiştirme değerleri ile yüksek rijitlik sergilemiştir.
- Sigma Profil: Maksimum gerilme 4.0 MPa, yer değiştirme ise yaklaşık 0.070 mm olup; bu durum düşük rijitliği ve yüksek deformasyon eğilimini ortaya koymaktadır.
- Özel Profil: Yaklaşık 2.0 MPa maksimum gerilme ve 0.039 mm maksimum yer değiştirme değerleri ile hem düşük deformasyon hem de yüksek dayanım göstermiştir.

Bu sonuçlara göre, özel profil hem gerilme hem de yer değiştirme açısından X eksen yönünde en başarılı yapıyı sergilemiştir. Sigma profilin, ST37 ve özel profile göre daha fazla deformasyon göstermesi ve daha düşük dayanım sergilemesi; ağır yük altında yetersiz performansla sonuçlanabileceğini ortaya koymaktadır. Özel profil ise düşük gerilme, düşük yer değiştirme ve yapısal kararlılığı ile optimize edilen tutucu için X yönlü yüklemelerde de teknik açıdan ideal bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Ağırlık avantajına ek olarak yapısal analiz sonuçları, montaj kolaylığı ve uzun süreli sabitlik performansı da dikkate alınarak seçim yapılmıştır. Sigma profiller, kanal yapısından ötürü hassas konumlama gerektiren uygulamalarda bağlantı noktalarında

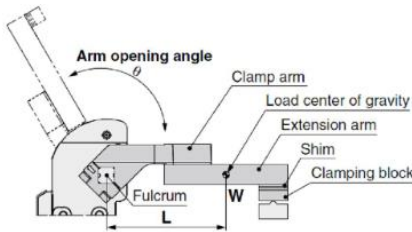
gevşeme ve pozisyon kaybı riski barındırmaktadır. Bu durum, literatürde yer alan bilgiler ve üretici kataloglarındaki teknik açıklamalar doğrultusunda öngörülmektedir [16]. Diğer yandan, özel profil (6063-T66) üzerindeki kanal delikleri sayesinde hassas konumlandırma olanağı sunmakta ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda bağlantı stabilitesini daha başarılı şekilde sürdürebilmektedir [19]. Bu değerlendirmeler sonucunda, 6063-T66 alaşımlı özel profil; düşük kütle, yüksek rijitlik ve stabil montaj kabiliyeti sayesinde optimize edilen tutucu tasarımı için en uygun yapı elemanı olarak belirlenmiştir. Bu tercih, robotik sistemlerde enerji verimliliği ve operasyonel kararlılık için sağlam bir temel oluşturmuştur.

2.2. Optimize Tutucu Tasarımı ve Yeni Ekipmanların Entegrasyon Süreci

Yapılan analiz çalışmaları sonucunda, esnek montaj kabiliyeti, hafiflik ve yoğun çalışma koşullarına dayanıklılık gereksinimlerini karşılayan özel markaya ait 6063-T66 alaşımlı, montaj delikli özel profil tercih edilmiştir. Bu profil, tasarlanan tutucunun iskelet yapısını oluşturacağından dolayı, tüm ek bileşenlerin bu yeni sisteme entegre edilebilir olması gerekmektedir. Tutucu tasarımı, kullanılacak elektrik ve pnömatik ekipmanların boyutları, bağlantı tipleri ve bu ekipmanların yerleştirileceği konumlara olan mesafeler dikkate alınarak şekillendirilmiştir.

Kenetleme fonksiyonunun sağlanması için ilk etapta geleneksel Asya tipi pnömatik silindirler değerlendirilmiştir. Ancak bu sistemlerin çok bileşenli ve karmaşık yapıları, geniş montaj alanı gereksinimi ve her tasarıma kolayca entegre edilememesi gibi dezavantajları, kompaktlık ve hafiflik önceliği taşıyan bu tasarımın gereklilikleriyle çelişmiştir. Ağırlık hafifletme ve montaj esnekliği hedefleri doğrultusunda, daha sade ve entegre edilebilir bir çözüm olan Powerklemp sistemleri tercih edilmiştir.

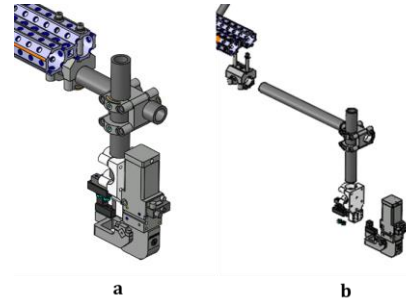
Tutucunun iş parçasını sabitleyen temel bileşenlerinden biri olan pnömatik tahrikli kenetleme mekanizmalarının (Powerklemp sistemleri) tasarıma doğru şekilde entegre edilmesi gerekmektedir. Bu sistemler, otomotiv sektöründe BIW (Body in White) üretim süreçlerinde kompakt yapıları ile yüksek verim sağlayarak farklı araç modellerine kolaylıkla uyum sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek rijitlikleri ve hassas kinematik yapıları sayesinde iş parçalarını kaynak fişturelerinde güvenli ve hassas bir biçimde konumlandırmaktadırlar [21].



Şekil 7. Powerklemp sistemlerine ait örnek bileşenler.

Figure 7. Sample components of Powerklemp systems.

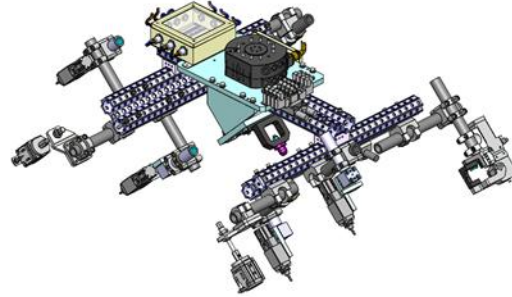
Piyasadaki Powerklemp sistemleri incelendiğinde, benzer çalışma prensiplerine ve birbirine yakın dış ölçülere sahip oldukları görülmüştür [17]. Şekil 8'de özel markaya ait standart profilin üzerine, güç sıkıştırıcı, ayar mili, mil sabitleyici ve profil bağlantı aparatı gibi ekipmanların yanı sıra entegre bir silindir yerleştirilerek tutucu montajı gerçekleştirilmiştir. Bu yapı içerisinde kullanılan açarlı silindir, robotik sistemde iş parçasını sabit tutarken; pim kenetleme silindiri ise hem merkezleme hem de kenetleme işlevini üstlenerek sistemde kompaktlık ve hafiflik avantajı sağlamıştır.



Şekil 8. Powerklemp mekanizmasının tasarıma entegrasyonu.

Figure 8. Integration of the Powerklemp mechanism into the design.

Bu yenilikçi ekipmanların kullanımı sayesinde, tutucu tasarımında kompakt ve esnek montaj yapısına sahip yeni bir yapı geliştirilmiştir. Bu yeni yapı sayesinde mevcut tasarıma kıyasla %28,5 oranında hafiflik elde edilmiş ve enerji tüketimi açısından daha verimli bir sistem oluşturulmuştur. Şekil 8'de gösterilen örnek yapı baz alınarak geliştirilen optimize tutucu tasarımı Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. Özel profil ile optimize edilen tutucu yapısı.

Figure 9. Optimized gripper structure with custom profile.

Robot sistemlerinde, taşıma kuvveti ile ekipman ağırlığı arasındaki oranlar, enerji kontrolü açısından kritik rol oynamaktadır. Taşınan ekipmanın daha hafif olması, robotun hareketlerinde daha düşük güç gereksinimi doğurarak enerji tasarrufuna önemli katkı sağlamaktadır [7].

2.3. Enerji Tüketimine Etki Eden Parametreler ve Teorik Değerlendirme

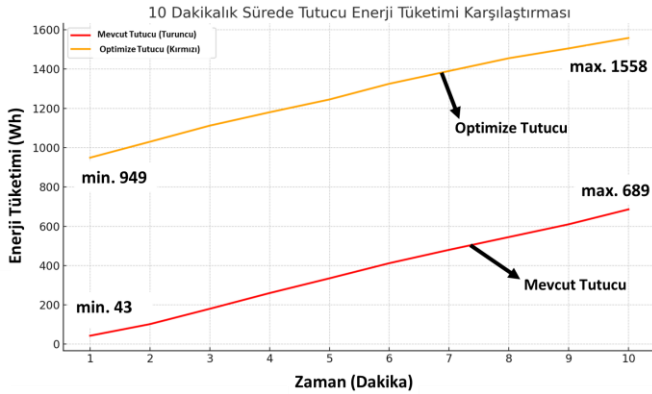
Yeni tutucu tasarımının imalatından sonra uygulanan optimizasyonların enerji tüketimi üzerindeki etkileri, yapılan ölçüm ve simülasyon çalışmalarıyla ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Robotun belirli ağırlık ve zaman aralığında uyguladığı kuvvet (N), kat ettiği mesafe (m), enerji tüketimi (Pg), uyguladığı tork (T), açısal hızı (ω) ve çalışma süresi (t) gibi parametreler, sistemin toplam enerji gereksinimini belirlemektedir. Bu parametrelerin her biri tutucunun ağırlığıyla doğrudan ilişkili olup, ağırlık azaltımı enerji tasarrufu açısından kritik bir avantaj sunmaktadır [11].

Robot sistemlerinde enerji tüketiminin analiz edilmesi, verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, enerji tüketimine yönelik iyileştirilebilecek alanlar ile müdahale edilemeyecek kısımların doğru bir şekilde tespit edilmesi gereklidir. Mevcut durumda robot sistemlerine özgü evrensel bir enerji performans standardı bulunmamakla birlikte, ISO 50001 standardı kurumsal düzeyinde enerji verimliliğini değerlendirmek amacıyla referans olarak kullanılabilir [22].

Bu kapsamda, mevcut tutucunun bağlı olduğu hat üzerinde, hem orijinal hem de optimize edilen tutucu yapıları, aynı robot kodu ile 10'ar dakika süreyle çalıştırılmıştır. Gerçekleştirilen bu karşılaştırmalı testte, 3 fazın voltaj, akım ve faz açısı değerlerini %1 toleransla kaydedebilen bir güç kalitesi ve enerji analizörü kullanılmıştır. Ölçüm cihazı yalnızca ilgili robot ünitesine bağlanarak, sistemden doğru ve izole verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu yöntemle, enerji tüketimi üzerinde yapılan optimizasyonun etkisi net ve karşılaştırılabilir şekilde analiz edilmiştir.

2.4. Güç Kalitesi ve Enerji Analizatörü ile Ölçüm Yapılması ve Verilerin Bilgisayar Ortamında Analiz Edilmesi

Fabrika içerisinde denemeleri yapılan bu çalışmada hedef belirlenen üretim hattı içerisinde kullanılan robotun harcadığı enerjinin ölçümünün yapılabilmesi adına robot panosuna FLUKE Marka 3 fazlı analizör bağlanmıştır. Mevcutta kullanılan tutucu ile optimize edilen tutucu arasında 27 kilogramlık bir fark altında 10 dakikalık bir çalışma süresinde harcanan enerji ölçümü yapılmıştır.



Şekil 10. Kutu profil (kırmızı) ve özel profil (turuncu) ile imal edilmiş tutucuların enerji tüketimi.

Figure 10. Energy consumption of grippers manufactured using box profile (red) and custom profile (orange).

Yeni ve mevcut tutucuların enerji tüketim performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla her iki sistem, aynı robotta, aynı üretim şartlarında ve 10 dakika süreyle çalıştırılmıştır. Ölçüm, üretim hattında bulunan robot panosuna direkt bağlanmış; böylece dış etkenlerden arındırılmış, net enerji verisi elde edilmiştir. Ölçüm cihazının kesintisiz veri kaydı yapması nedeniyle başlangıç değerleri farklı olmakla birlikte, esas analiz süresince elde edilen artış verisi karşılaştırma için esas alınmıştır.

Şekilde görüldüğü üzere:

- Mevcut tutucu (kırmızı çizgi), 10 dakikalık işlem süresi sonunda enerji tüketimini 43 Wh - 689 Wh aralığında gerçekleştirmiştir.
- Optimize edilen tutucu (turuncu çizgi) ise aynı sürede 949 Wh - 1558 Wh aralığında tüketim göstermiştir.

Ortalama enerji tüketimini görebilmek için maksimum değer ile minimum değer arasındaki fark alınacaktır. Bu yöntem ile kutu profil ile yapılmış olan mevcut gripper için,

$$\begin{aligned} E (\text{Ortalama Enerji Harcaması}) &= E_{\max} - E_{\min} \\ &= (689 - 43)Wh \\ &= 646 Wh \end{aligned}$$

Mevcut tutucu ile 10 dakika çalışmada 646 Wh ortalama enerji tüketimi gözlemlenmiştir. Optimize edilen tutucu ile yapılan 10 dakika ölçüm sonucunda,

$$\begin{aligned} E (\text{Ortalama Enerji Harcaması}) &= E_{\max} - E_{\min} \\ &= (1558 - 949)Wh \\ &= 609 Wh \end{aligned}$$

Optimize tutucu ise 609 Wh ortalama enerji tüketimi gözlemlenmiştir. Bu durum ile birlikte elde edilen saatlik/günlük (2 vardiya)/haftalık ve yıllık olarak tüketim verileri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Süreye bağlı harcanan ortalama enerji (kWh) ve farkı.

Table 3. Time-based average energy consumption and energy savings (kWh).

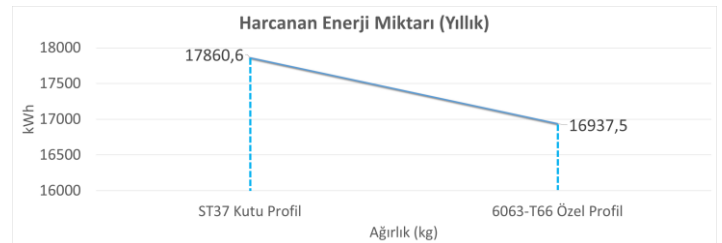
Süre	Mevcut Tutucu	Optimize tutucu	Fark
10 dakika	0,646	0,609	0,037
1 Saat	3,876	3,654	0,222
2 Vardiya (16 Saat)	62,016	58,464	3,552
Haftalık	372,096	350,784	21,312
Aylık	1488,4	1403,1	85,3
Yıllık	17860,6	16937,5	923,1

Tabloya göre 10 dakikalık enerji tüketimi baz alınarak saatlikten yıllığa kadar yapılan hesaplamalarda optimize tutucu yapısının ciddi miktarda enerji tasarrufu sağladığı görülmektedir. Özellikle yıllık bazda 923,1 kWh değerinde bir tasarruf elde edilmesi, enerji verimliliği açısından optimize tasarımın ne derece etkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu farkın üretim ortamında yaygın olarak uygulanabilir olması, enerji maliyetlerini düşürecek ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Ölçümler, yapılan optimizasyonun yalnızca yapısal değil, operasyonel olarak da yüksek verim sağladığını kanıtlamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan bu çalışma kapsamında, yeni alternatif ekipmanların kullanımı ve esnek montaj yöntemlerinin entegrasyonu ile birlikte tutucu tasarımında toplam 27 kg'lık bir hafifletme sağlanmıştır. Bu hafifletme, yalnızca mekanik avantaj sunmakla kalmamış, aynı zamanda robotik sistemin enerji tüketimini doğrudan etkilemiştir. Ağırlık azaltımı sayesinde robotun taşıma sırasında harcadığı güç düşmüş, böylece enerji verimliliği artırılmıştır.

Bu doğrultuda yapılan karşılaştırmalı ölçüm sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Şekilde, optimize edilen tutucunun yıllık enerji tüketiminin, mevcut yapıya kıyasla daha düşük olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 11. Ağırlık - enerji tüketimi ilişkisi (yıllık).

Figure 11. Relationship between gripper weight and annual energy consumption.

Ağırlık azalmasına bağlı olarak robotun ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi de önemli ölçüde azalmış, bu durum toplamda 1 robot için 923,1 kWh yıllık enerji tasarrufu sağlamıştır. Enerji tüketiminde sağlanan bu azalma, doğrudan karbon salımını da

etkilemiş; çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamıştır [16]. Elde edilen verilere göre Enerji Bakanlığının yayınladığı elektrik tüketimi karbon gazı etkisi 1 MWh için 0,442 ton kabul edilmektedir. [23]

Ölçümler kWh olarak aktarılmasından dolayı MWh'ı kWh'a dönüştürmek için işlem içerisinde dönüşüm yapılmıştır. Bu bilgilere göre yıllık oranda,

$$CO_2 \text{ Ayak İzi} = \frac{(\text{Elde Edilen Tasarruf}) \times 0,442 \frac{kg}{kWh}}{1000}$$

$$CO_2 \text{ Ayak İzi} = \frac{923,1 \times 0,442 \frac{kg}{kWh}}{1000}$$

$$CO_2 \text{ Ayak İzi} = 0,408 \text{ kg} [23]$$

1 robot için 0,408 kg CO₂ azaltımı yapılmıştır.

Bu tasarrufun yüzdesel olarak değerlendirilmesi amacıyla, enerji tüketim eğrisinde ölçülen maksimum ve minimum değerler arasındaki fark, maksimum değere oranlanmış ve Denklem 1'de gösterilen şekilde hesaplama yapılmıştır:

$$Eortalama = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} \times 100$$

$$Eortalama = \frac{17860,6 - 16937,5}{17860,6} \times 100$$

$$Eortalama = \frac{923,1}{17860,6} \times 100$$

$$Eortalama = \%5,13$$

Her iki tutucu için fark oranlandığında, ağırlıktaki 27 kg'lık azalma ile elde edilen 923,1 kWh yıllık enerji tasarrufu yaklaşık %5,13 oranında bir kazanç sağlamaktadır. Enerji ve çevresel verimlilik açısından değerlendirildiğinde, optimize edilen tutucu yapısı hem endüstriyel hem de sürdürülebilirlik hedeflerine olumlu katkı sunmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, kaynak fişkürlerinde kullanılan tutucu yapısının optimize edilmesiyle enerji tüketimi üzerinde sağlanabilecek tasarruf detaylı olarak analiz edilmiştir. Mevcut sistemle karşılaştırıldığında, özel profil ve Powerklemp sistemleri kullanılarak geliştirilen yeni tutucu yapısında %28,5 oranında hafifleme elde edilmiştir. Yapılan deneysel ölçümler sonucunda, bu hafifletmenin robot sisteminde enerji tüketimini doğrudan etkilediği ve 1 robot için yıllık bazda 923,1 kWh ile %5,13'lük düzeyinde bir enerji tasarrufu sağlayarak 0,408 ton'luk bir karbon ayak izi azaltımı yapıldığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, robotik üretim hatlarında ekipman ağırlığının azaltılmasının enerji verimliliğine doğrudan katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. 1 robot için elde edilen yıllık veriler baz alındığında fabrikalarda gözle görülür ve önemli oranda hem enerji tasarrufu yapılabileceği, buna bağlı olarak karbon salınımının azaltımında ciddi oranları yakalanabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, ilerleyen süreçte alternatif malzemelerin kullanımı ile zincirleme tasarruflar gündeme gelecektir.

Bu çalışma, enerji verimliliği odaklı mekanik tasarım yaklaşımlarının üretim süreçlerine entegre edilmesinin, sürdürülebilir ve çevreci üretim hedefleri doğrultusunda önemli katkılar sunabileceğini ortaya koymuştur.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Bu çalışma kapsamında etik kurul izni gerektiren herhangi bir durum bulunmamaktadır. Yazar, bu çalışma ile ilgili herhangi bir kişi veya kurum ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder.

Teşekkür

Bu çalışma, TOYOTETSU Ar-Ge merkezi bünyesinde yürütülen özkaynaklı proje kapsamında desteklenmiştir.

Yazar katkılarının beyanı

Özgür Yalçın: Çalışma fikrinin oluşturulması, deney tasarımı, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi ve makalenin yazımı ile ilgilenmiştir.

Üretken yapay zeka beyanı

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde üretken yapay zeka araçları yalnızca dil ve yazım düzenleme amacıyla kullanılmıştır. Tüm bilimsel içerik yazara aittir.

Kaynaklar

- [1] Cirkin E, Ozdagoglu A. Endüstri 4.0 bünyesindeki otonom robotların sürdürülebilirlik perspektifleri açısından değerlendirilmesi. Erciyes Akademisi 2021;35(4):1534-1553.
- [2] Bryan C, Grenwalt M, Stienecker A. Energy consumption reduction in industrial robots. In: Proc ASEE North Central Sectional Conference; 2010.
- [3] Ivanov V, Andrusyshyn V, Pavlenko I, Pitel J, Bulej V. New classification of industrial robotic gripping systems for sustainable production; 2024.
- [4] Bugday M. Endüstriyel robot kollarının tasarımından kaynaklanan olu yu klerin sonlu elemanlar yöntemi ile optimize edilmesi ve işletme maliyetlerine etkisinin incelenmesi [master's thesis]. Necmettin Erbakan University; 2018.
- [5] Shah NSEB, Osman K, Zainuddin N. 5-axis of Mitsubishi RV-2AJ robotics arm modelling using SolidWorks. In: 2020 16th IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA). 2020, p. 207-212.
- [6] Meike D, Ribickis L. Energy efficient use of robotics in the automobile industry. In: 2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). 2011, p. 507-511.
- [7] Yılmaz M, Karakas E, Colak ZG, Kuzucu A. Pnömatik yapay kaslı robot kolunun konum kontrolü.
- [8] Permin A, Palisaitine J, Mannheim T, Buhse K, Schmitt R, Corves B, Bjorkman M. Applied Mechanics and Materials 2016;840:8-15.
- [9] Thollander P, Danestig M, Rohdin P. Energy policies for increased industrial energy efficiency: evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs. Energy Policy 2007;35(11):5774-5783.
- [10] Chemnitz J, Schreck G, Kruger J. Analyzing energy consumption of industrial robots. In: ETFA 2011. 2011, p. 1-4.
- [11] Paryanto, Brossog M, Bornschlegel M, Franke J. Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. Int J Adv Manuf Technol 2015;78:1315-1328.
- [12] Mohammed A, Schmidt B, Wang L, Gao L. Minimizing energy consumption for robot arm movement. Procedia CIRP 2014;25:400-405.
- [13] Patil V, Narnaware T, Gangwani NR, Raykar. Development of flexible universal gripper for handling lightweight parts of arbitrary shape. Mater Today Proc 2020.
- [14] Schuh G, Bergweiler G, Fiedler F, Holtgen C. Assessment for CO₂-reduced production by using additively manufactured lightweight robot grippers. In: 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2022, p. 1411-1415.
- [15] Gabriel F, Fahning M, Meiners J, Dietrich F, Droder K. Modeling of vacuum grippers for the design of energy efficient vacuum-based handling processes. Prod Eng 2020;14:545-554.
- [16] Onat M, Korkut E, Akdikmen O. Hafifletilmiş modüler robot tutucu tasarımı. In: V Ulusal Muhendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi; 2023.
- [17] Wang Y, Gupta U, Parulekar N, Zhu J. A soft gripper of fast speed and low energy consumption. Sci China Technol Sci 2019;62:31-38.
- [18] Schmalz J, Giering L, Holze M, Huber N, Reinhart G. Method for the automated dimensioning of gripper systems. Procedia CIRP 2016;44:239-244.
- [19] Telegenov K, Tlegenov Y, Shintemirov A. An underactuated adaptive 3D printed robotic gripper. In: 2014 10th France-Japan/8th Europe-Asia Congress on Mechatronics. 2014, p. 110-115.
- [20] Minsch N, Nosrat-Nezami F, Gereke T, Cherif C. Review on recent composite gripper concepts for automotive manufacturing. Procedia CIRP 2016;50:678-682.

- [21] Keller C, Putz M. Force-controlled adjustment of car body fixtures-verification and performance of the new approach. *Procedia CIRP* 2016;44:359-364.
- [22] Stuja K, Katalinic B, Aburaia M, Pajaziti A. Design of a robot application with regard to energy efficiency. *Ann DAAAM Proc* 2021.
- [23] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Elektrik üretim-tüketim emisyon faktörleri. Available from: <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri> [Accessed 29 July 2025].