

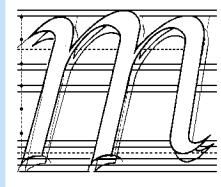
ISSN 2667-4297

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 17

Sayı: 1

Mayıs 2019



m a t i m

**Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
ATILIM ÜNİVERSİTESİ - ANKARA**

Yayın Kurulu

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

ODTÜ
ODTÜ
Gazi Üniversitesi
Atılım Üniversitesi

Kurul Üyeleri

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

ODTÜ
Çankaya Üniversitesi
İTÜ
Atılım Üniversitesi
Sabancı Üniversitesi
İsmail DURGUN Eğitim ve Danışmanlık
ODTÜ Kuzey Kıbrıs
Sakarya Üniversitesi
Gaziantep Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
ODTÜ
Bilkent Üniversitesi
Koç Üniversitesi
İYTE
Rutgers Üniversitesi
Uludağ Üniversitesi
Osmangazi Üniversitesi
EGE Üniversitesi
FNSS
Marmara Üniversitesi
Balıkesir Üniversitesi
YTÜ

Danışma Kurulu

Tuna BALKAN
Melik DÖLEN
O. Selçuk YAŞI
Yiğit YAZICIOĞLU
Orhan YILDIRIM

ODTÜ
ODTÜ
ENVY A.Ş.
ODTÜ
ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

MakinaTasarımveİmalatDerneği
Metal ŞekillendirmeMükemmeliyetMerkezi
ATILIM Üniversitesi
İncek, ANKARA
Tel : (312) 586 8860, 586 8368, Faks : (312) 586 8091
Web: <http://matim.org.tr/>
e-mail : matim@atilim.edu.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 17 Sayı: 1

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 17 No: 1

ISSN 2667-4297

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ'nindir. 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.

ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli gerçek kişiler için 20 TL, firma ve kuruluşlar için 60 TL, öğrenciler için 10 TL'dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimize gönderilmesi yeterlidir.

TANITIM KOŞULLARI

Kuruluş ve ürünlerini tanıtmak isteyenler hazırlayacakları tanıtım yazı ve resim taslaklarını Derneğimiz'e göndererek saptanacak bir katkı karşılığında Dergi'de yayımlanmasını sağlayabilirler.

BANKA HESAP NUMARASI

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
T. İş Bankası, ODTÜ Şubesi
Hesap No: 4229 0235339
IBAN:
TR430006400000142290235339
Dergi, Dernek Üyelerine ücretsiz iletilir.

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Effect of Vibratory Stress Relief on Fatigue Life of S355J2 Steel Welded Joints 1

Sinem Kacar
Oguzhan Yilmaz

Taşınabilir Hafif Yüzey Taşlama Makinasının Tasarım ve İmalatı 9

Mehmet Yüksel
Ezgi Kılınç
Server Kanberlioğlu
Boran Güneri
Bilgin Kaftanoğlu
Şakir Baytaroğlu
Tuğçe Hacaloğlu

Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Bükümünde Geri Esneme Açısının Görüntü İşleme ile Belirlenmesi 16

Barış Çetin
Eren Billur
Besim Baranoğlu
Türkay Muratoğlu
Murat Mutlu Yılmaz

Estimation of Workload for Aircraft Design Projects By Using Fuzzy Logic 21

Veysel Cenk Karakuz
Özlem Müge Testik

Alüminyum 6061 Malzemenin MQL Yöntemi ile Frezelenmesinde Nano MoS₂ Katkılı Kesme Sıvısı Kullanımının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi 31

Derviş Berk Cönger
Uğur Emiroğlu
Alper Uysal
Erhan Altan

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.

2016 yılında YÖK tarafından yeni olarak istenen Doçentlik için yerli yayın zorunluluğu için de dergimiz uygun bir platform olacaktır. Dergimizin Mayıs ve Kasım aylarında çıkarılabilmesi için de makale katkılarınızı beklemekteyiz. Bu sayede, dergimiz TÜBİTAK ULAKBİM tarafından taranan dergiler arasına girecektir. Dergimiz, 2017 yılındanberi TÜBİTAK DERGİPARK ortamında yayınlanmaktadır. Dergimizin eski sayılarına da bu ortamda ulaşılabilir. Ayrıca yeni web sayfamızda (<http://matim.org.tr/>) Dergimiz ve Derneğimiz ile ilgili bilgiler bulunmaktadır.

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

Sinem KacarHİDROMEK A.Ş., 1.OSB, Sincan,
06935, Ankara, TURKEY
sinem.kacar@hidromek.com.trAdvanced Manufacturing Technology
Research Group, Department of
Mechanical Engineering, Gazi University,
Celal Bayar Boulevard, 06570, Maltepe,
Ankara, TURKEY**Oguzhan Yilmaz**Advanced Manufacturing Technology
Research Group, Department of
Mechanical Engineering, Gazi University,
Celal Bayar Boulevard, 06570, Maltepe,
Ankara, TURKEY
oguzhanyilmaz@gazi.edu.tr

Effect of Vibratory Stress Relief on Fatigue Life of S355J2 Steel Welded Joints

This study presents an investigation on Vibratory Stress Relief (VSR) method in order to reduce residual stresses in welded parts. Mechanical properties of the welded parts were compared for the vibratory stress relieved welded parts and non-stress relieved welded parts. Firstly, tensile tests were carried out and then the hardness measurements were accomplished. To investigate the effects of residual stresses on fatigue life, the residual stress values in front and back of the welded plates were measured. Three-point fatigue tests were also performed to show the effectiveness of VSR in terms of fatigue life. It was obtained that the tensile strength and the surface hardness ascended slightly and fatigue life increased about three times and residual stresses on surface decreased after applying the VSR method.

Keywords Fatigue life, residual stress, vibratory stress relief method, welding

1. INTRODUCTION

Welding is one of the primary methods used in joining metallic parts. Welding methods are also used effectively in fabricating of large steel structures such as heavy duty machines, ships, bridges and dams. Strengths and longevity are the most important factors for successes and fulfilment of such structures under high fatigue loads. There might be many reasons that affect the fatigue life in welded structures. The main ones are the residual stresses, surface processing, stress concentration and corrosion effects [1]. Weld zone of the part heats up to the melting temperature during welding. However, the cooling is slower overall in the part in comparison to the heating rate. Hence, the cooling distribution in the welded parts is not homogeneous and structural changes occur during the welding process. While the parts that cooled early have compressive stresses, the parts that cooled later have tensile stresses. As a result, the welding zone is forced to gain tensile stresses through the weld seam direction [2]. In material selection and design, it is very important to know the residual stress distribution in the material to be used, in advance. For this reason, measurement of residual stress is a very common engineering practice today. Tensile stress in structural element is generally destructive, which can cause to

early fatigue failure and stress corrosion cracking and it could be the main cause. Compressive residual stresses are generally useful because of propagation of fatigue cracks, increase wear and corrosion resistance [3].

Destructive and non-destructive residual stress measurement methods are used for a long time. One of the effective residual stress measurement method is Magnetic Barkhausen Noise method and this method has become more important today in terms of quick and reliable results, portability and easy of use. Barkhausen noise method is based on the principle of analysing a magnetic noise generated by a ferromagnetic material during magnetization. A measurement is made through probes which can be specially prepared according to the material geometry. Measurement values are based on magnetic parameter (MP). Calibration curves are used to find real residual stress value. Generally, tensile residual stresses in the material increase the MP values while the compressive residual stresses decrease MP values [3].

Generally, welding fatigue improvement methods are studied in two main categories as welding geometry improvement and residual stress relief.

Residual stress relieving methods increase the fatigue life by transforming the tensile stresses in the regions where the cracks are likely to occur to compressive stresses [4]. Heat treatment emerges as the most effective method for eliminating residual stresses for many years. However, the researchers have been searching for different methods for stress relieving due to some limitation of heat treatment such as high cost, time consuming and inconviency for every material [5]. Vibratory stress relief (VSR) has emerged as an alternative method in the last 60 years. Nowadays, it is applied in many industrial fields such as manufacturing, molding industry, automotive industry and ships industry [6]. It is based on the principle that it applies vibrations at resonance frequency or near resonance frequency to the work piece and vibrated part absorbs the energy that will reduce residual stresses of the part [7]. It is aimed that dislocations enter a regular state with absorbed vibratory energy. So that residual stresses are expected to decrease. VSR method has been used in previous studies in different materials, shape, size and weld. In many studies, it was examined that residual stress descended when VSR applied after welding process with different percentage. Moreover, it is also seen VSR increased the strength of the parts by means of tensile and yield points, but shifting rate is not very high. Material damping capability, applied frequency and externally applied dynamic force are essential and variable; effectiveness of application can vary on each material and structure. Time saving, low cost, low distortion, and applicable for large-scale parts are the advantages of the VSR method over other stress relieving processes. A major limitation of VSR, however, is the lack of thorough understanding of the phenomenon, resulting in a lack of confidence in the broad application of the process. Without this understanding it is difficult for engineers and manufacturing managers to determine when, where and how the VSR process can be effectively applied and especially where fatigue is of major concerns [7]. In 2009, theoretically the mathematical modeling of vibration stress relief was theorized. But it was expressed that the obtained results by experimental studies need to be compared to empirical expressions in this model [7]. In 2003, the influence of VSR effect on the Ck 35 steel shaft used in shipbuilding was examined. Different mechanical tests were applied to investigate the variation of mechanical properties of the part within the scope of the study [8]. In another study in 2003, the effects of VSR on low-alloyed high-strength welded steels and also the change in residual stresses distribution on welded plate were investigated [9]. Although there are some papers about effect of vibration stress relief method on residual stress and the change of mechanical properties (hardness and strength), there are only a few of papers about effect of vibration stress relief method on fatigue life. But it

is known that this process will improve fatigue life because of decrease residual stress and increase toughness of material. This paper presents the results of the test of vibration stress relieving of S355J2 steel. Mechanical properties' differences and residual stress change were investigated between vibration stress relief welded parts and non-stress relief welded parts and the effect of this method on the fatigue life was studied.

2. EXPERIMENTAL PROSEDURE

In this section, materials, test equipments, conducted tests, and the selected test parameters used in this work are introduced.

2.1. Materials

In this study, S355J2 steel formerly known St52-3 was used as a test material since it is widely used in the metal construction industry. The chemical compositions and mechanical properties of S355J2 steel declared by the manufacturer are shown in Table 1 and Table 2.

Table 1. Chemical compositions of S355J2 steel.

Standard Designation		Chemical Composition					
Standard	Quality	C	Mn	P	S	Si	Cu
EN 10025-2	S355J2	0.20	1.6	0.025	0.025	0.55	0.55

Table 2. Mechanical properties of S355J2 steel.

Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%) min.
355	470-630	20

2.2. Test Specimens

Separate plates were prepared for tensile, fatigue, hardness and residual stress measurement tests. Specimen thickness was chosen as 10 mm. To ensure that all of the test specimens had the same characteristics. The large specimens were first welded and then the test specimens were sampled from the large specimens. Dimension of large specimens was 600mm X 225mm X 10mm, Figure 1. Metal active gas (MAG) welding was used during the joining process of the steel plates. Welding parameters are shown in the Table 3. One pass weld was made considering thickness of the plate. After welding process, grinding process was not performed on the plate root section in order to avoid residual stresses change. MAG welding process for residual stress and hardness measurement samples can be seen in Figure 2. In order to minimize the residual stress change in fatigue and tensile test

Table 3. Welding parameters of test samples.

Welding Travel Speed (cm/dk)	Welding Wire Speed (m/dk)	Welding Current (A)	Welding Voltage (V)
25	10	270-280	17-28

samples, during laser cut 8 mm clearance was given from edge of every sample. Then samples were processed to their exact size according to standard.

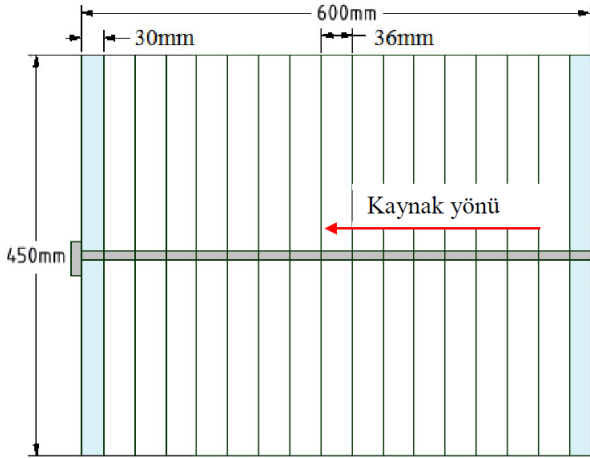


Fig. 1. Fatigue test samples from welded plate

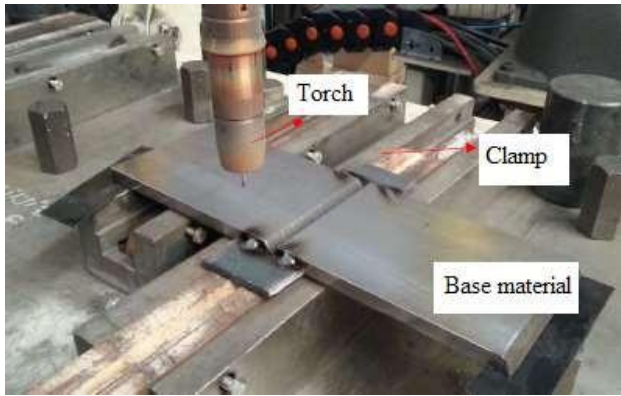


Fig. 2. Welding procedure – Residual stress measurement sample

All mechanical tests have been carried out in accordance with standards in laboratories with accreditation certificate. Tensile samples produced according to TS 287-EN 895 standard as shown in Figure 3. Tensile tests were carried out on Zwick tensile test device with a load capacity of 250 kN in university laboratory. Vibratory stress relief process was then applied to three samples of the six samples. Hardness measurements were accomplished according to Standard Brinell Hardness Method and the measurement position and direction are shown in Figure 4 and Figure 5. During the measurement DHT 100 hardness tester device was used. The measurements were taken at approximately 1 mm

intervals perpendicular to the welding cross-section along a line from the full mid-axis of the welded plate. Hardness values were taken from both the front and back surfaces of the welded plate. Residual stress measurements were made according to Magnetic Barkhausen method with Stress Tech Microscan 500-2 test device and three samples were used. 125 Hz sinusial magnetic field was used during Magnetic barkhausen noise measurement, which was adjusted according to S355J2 steel. The collected Barkhausen signals were by 10 Hz. 100000 and direction of the collected values are seen in Figure 4 and Figure 5. Fatigue tests are carried out to determine the fatigue strength of materials exposed to dynamic loads. During the tests MST 322 Test Frame was used. In this study, three-point bending fatigue tests were performed. Before the fatigue tests, static bending test was conducted and four different loads were determined. The sample used in the fatigue and bending test is shown in Figure 6.

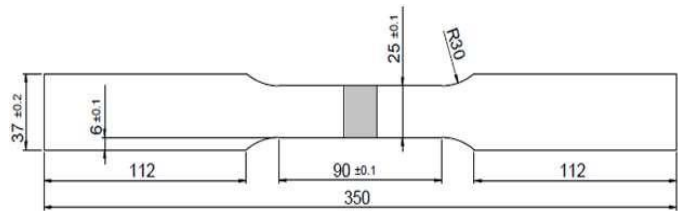


Fig. 3. Tensile test sample (dimensions are in mm)

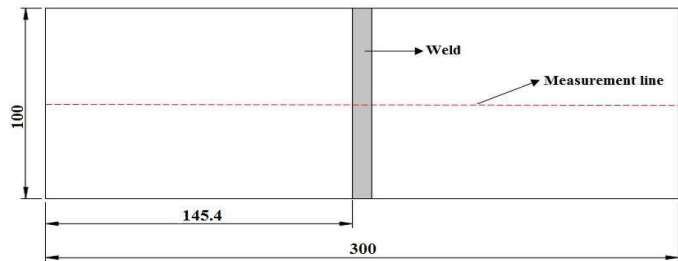


Fig. 4. Hardness and residual stress measurement test sample (dimensions are in mm)

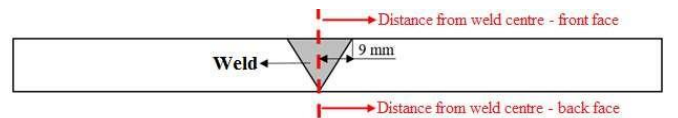


Fig. 5. Welded plate front and back face measurement positions

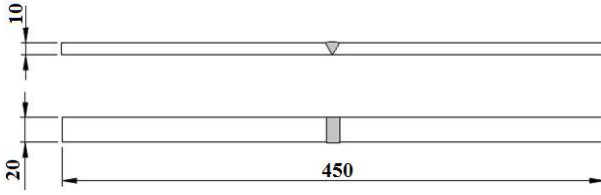


Fig. 6. Fatigue and bending test sample (dimensions are in mm)

2.3. Application of Vibratory Stress Relief Process

Vibratory stress relief system has three parts, which are force producer (vibrating machine), transducer, control, and accelerometer. During vibration stress relief process manual system Meta-Lax 2020 was used as a vibration machine. First samples were fixed to table. The locations where the samples are fixed are positioned according to the impact area determined by the manufacturer according to the capacity of the device. Resonance frequency of the complete structure including table and test specimens was determined by the device. Resonance frequency, the most effective frequency level to reduce residual stresses. After the test samples (parts) were shaken with the force generating part. By taking continuous measurement with the accelerometer from the test part, the part is constantly vibrated at desired frequency. Structure is vibrated at the same frequency value with transducer and control sections. Figure 7 and Figure 8 show VSR working cycle and VSR application example. In this work, all the test specimens were vibrated at 90 Hz for about half an hour.

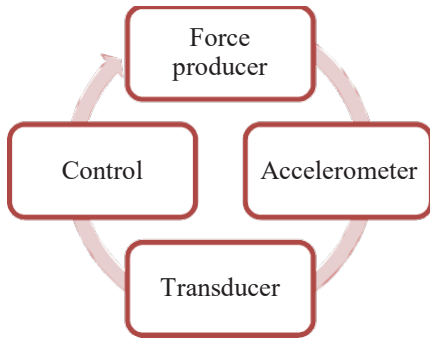


Fig. 7. Vibration stress relief working cycle

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Mechanical Test Results

Numeric results of the tensile tests of three as-welded parts and three vibratory treated specimens are shown in Table 4 and Table 5, respectively. The tensile test results show that the vibration stress relief did not

reduce neither yield strength nor tensile strength. On the other hand, it is known that the thermal stress relieving decreases tensile and yield point [10-11]. It is also observed that the vibratory stress relief nearly does not change the material strength property and even improves elasticity modulus and tensile strength. Elasticity modulus measures substance's resistance to being deformed elastically when stress is applied to it. According to average results of three sample, this value increased from 197.6 GPa to 211.6 GPa so the toughness of the test part grew at about 7.1%. Because of the vibration energy absorption during the treatment, the bonds between the irregular state atoms became stronger and as a result of the strengthening of the bonds, the modulus of elasticity increased.

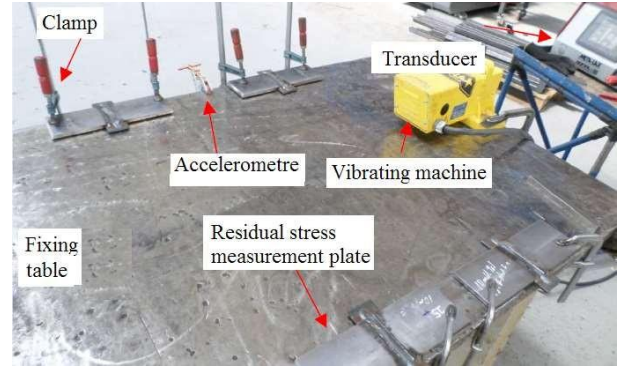


Fig. 8. Fatigue and bending test sample

Table 4. Tensile tests result of as-welded specimens

Sample No	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elasticity Modulus (GPa)
1	398	555	196
2	386	551	200
3	410	548	197
Average	398	551.3	197.6

Table 5. Tensile tests results of vibratory treated specimens

Sample No	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elasticity Modulus (GPa)
1	412	552	216
2	393	556	218
3	409	555	201
Average	404.6	554.3	211.6

Brinell hardness method was used to measure the hardness change after the vibratory treatment. Hardness measurement plate was used as shown in Figure 4. As a result of the hardness measurements, the collected values showed that the applied vibratory stress relief process after welding increased harnesses

on both sides of the test part. The front and back face results can be seen in Figure 9 and Figure 10, respectively. At the front face, 13 mm from weld center 1 HB enhanced while 6 HB rise was measured at 24 mm from weld center. As for back face, 5 HB and 15 HB change were seen at 9 mm and 13 mm from the weld center, respectively. When looking at the graphs in general, the variation in hardness values near the weld is less, while the hardness values in the regions farther from the weld are greater. The reason for this could be the grain size and they type of microstructure change in the heat-affected zone [10]. Other reason might be the local work hardening during the vibration stress relief process.

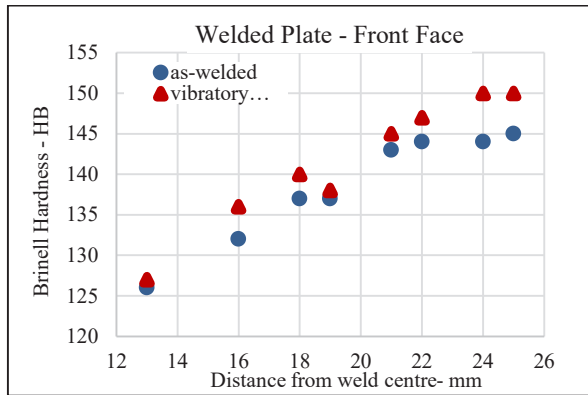


Fig. 9. Welded plate front face hardness value

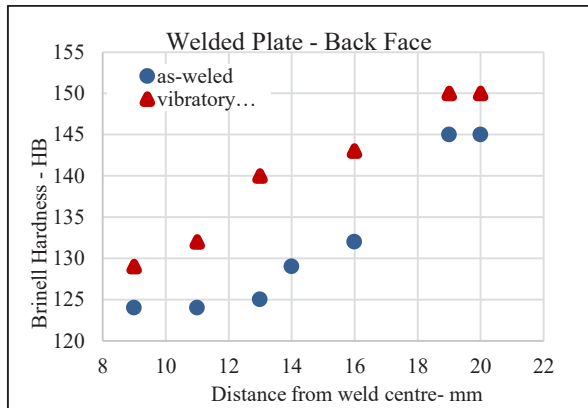


Fig. 10. Welded plate back face hardness value

There is a direct relationship between the hardness values and the tensile strength of the material. It shows that when the hardness value of the part rises, the value of tensile strength increases. Therefore, the increase in hardness value according to test results is in good agreement with the increase in yield and tensile strength. Before the fatigue tests, first static three point bending test was performed according to the standard. The yield point of the material was determined during the static bending test. The forces to be applied in the fatigue tests were determined. In Figure 11, the static three-point test results can be seen. The point where the plastic

deformation starts is 2.4 kN and the displacement value corresponding to this load is 1 mm. In that case, it is obvious that the test material is ductile and no fracture occurred during test.

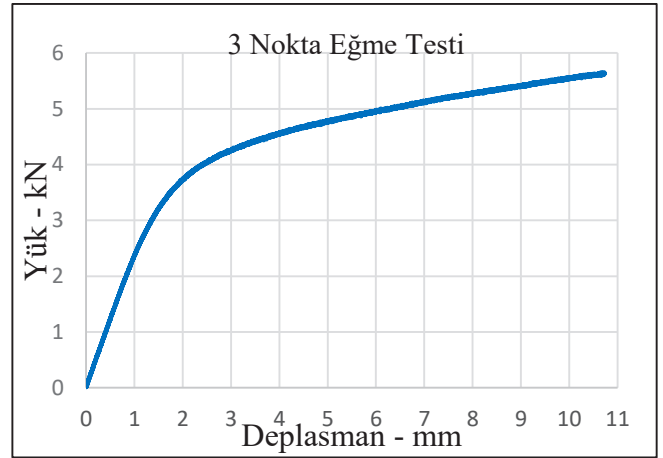


Fig. 11. Three-point bending test results

3.2. Residual Stress Relief Measurement Results

To investigate the effects of residual stresses on fatigue life, residual stress changes of front and back of the welded plates were measured by Magnetic Barkhausen Method. These measurements are based on magnetic parameter (MP). Calibration curves, which is specific for each material, must be used to find stress value. Since calibration curve determination for used material requires a comprehensive, long and time-consuming study, residual stresses were compared as MP value and percental decreases were determined in this study. Residual stress change results for three samples on the front and back of the welded plate are examined in Figure 12 to Figure 17. The curves obtained from front and back face are generally similar to those of previous studies in the literature [3]. After vibratory stress relief process, the decreases in residual stress values with different percentages on both front and back face were examined. Residual stresses descent after vibratory treatment where the similar results were seen in similar studies but for different materials [8, 12, 14, 15]. The amount of reduction in residual stress change depending upon the application point of vibration, applied frequency, amplitude and the damping capability of the applied material [7]. It is considered that during VSR practice due to vibration energy plastic deformation may occur and therefore residual stresses have decreased on samples surfaces. At front face for 1st sample, the residual stress of welded plate decreased from 125 MP to 110 MP with 12% improvement and 20% reduction at the back face near the weld zone.

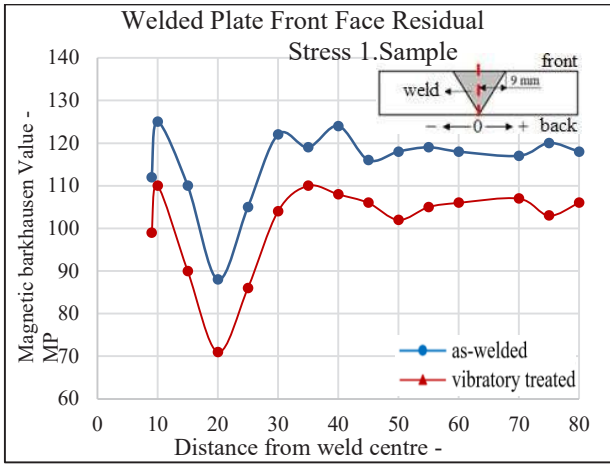


Fig. 12. Welded plate front face residual stress – 1. Sample

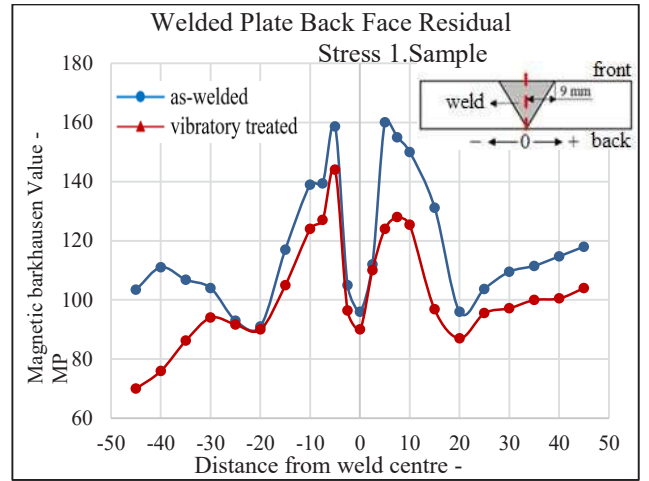


Fig. 15. Welded plate back face residual stress – 1. Sample

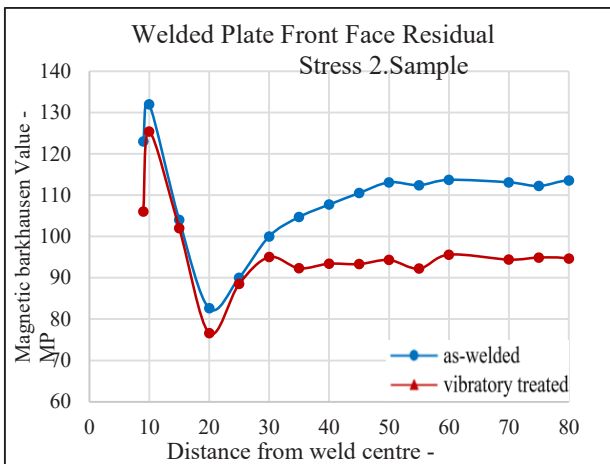


Fig. 13. Welded plate front face residual stress – 2. Sample

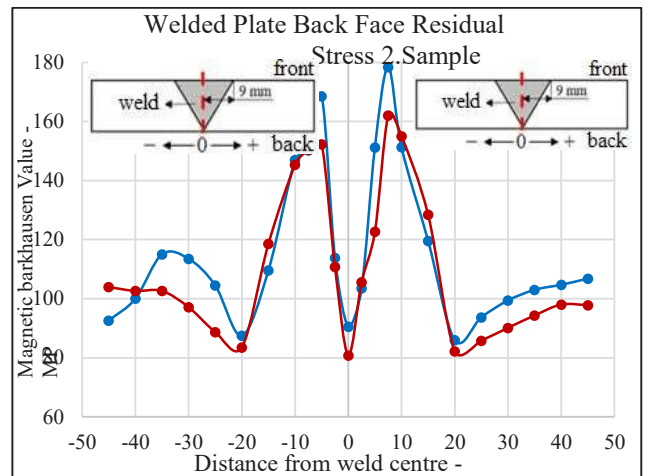


Fig. 16. Welded plate back face residual stress – 2. Sample

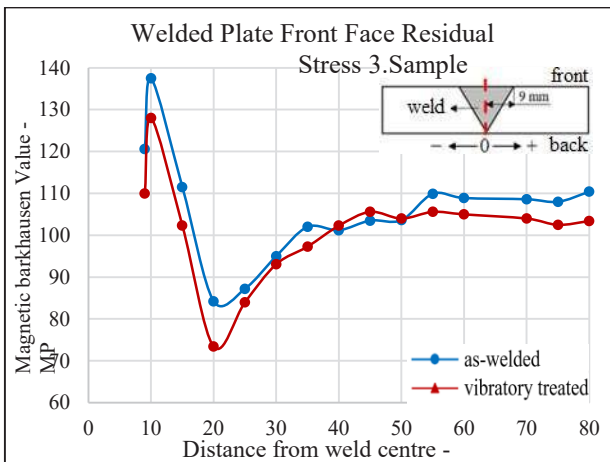


Fig. 14. Welded plate front face residual stress – 3. Sample

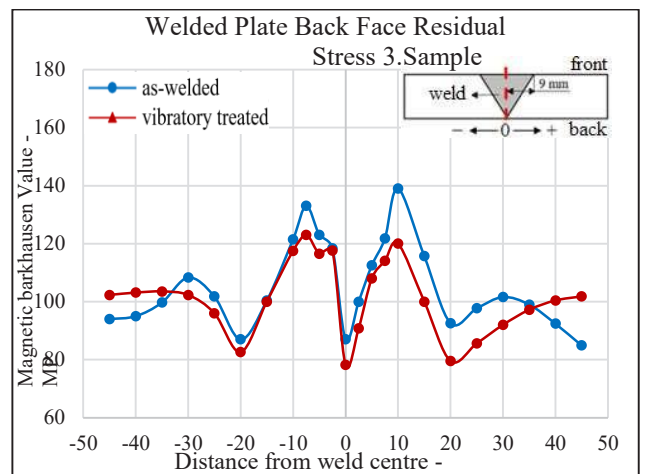


Fig. 17. Welded plate back face residual stress – 3. Sample

3.3 Fatigue Result

After static bending test, yield point was determined and selected four different loads (2.3, 2, 1.6 and 1.25 kN) were applied to the samples for testing the fatigue life. The tests were carried out at 6 Hz and R=0.9 ratio. Before general fatigue test results, the displacement behavior difference was examined under the same load and cycle between vibratory treated after welding and as-welded test samples as can be seen in Figure 17. Under 1.6 kN dynamic load, as-welded part goes from 0.66 mm to 0.7 mm, while vibration treated part only goes from 0.66 mm to 0.67 mm. This result also overlaps with the increase elastic modulus previously obtained from the tensile tests.

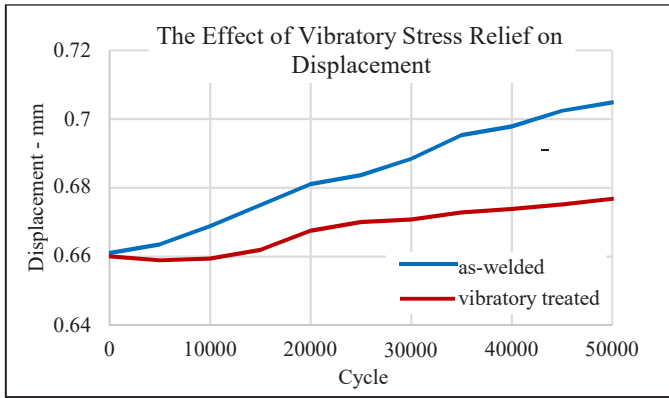


Fig. 17. The effect of vibratory stress relief on displacement

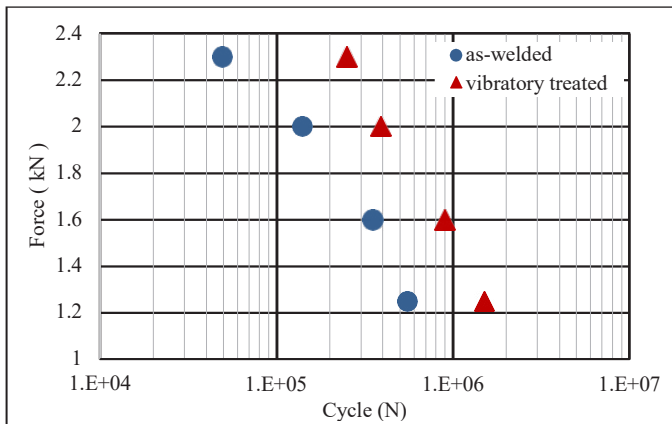


Fig. 18. Fatigue tests results

As-welded and vibratory treated samples' fatigue tests results are shown in Figure 18 and Table 6. Applied loads were 2.3, 2, 1.6, and 1.25 kN respectively. It was observed that the fatigue life increased about three times after vibration stress relieving process. The main reason for the increase in fatigue life of vibratory treated specimens is the tendency to deform less under the same load. The increase in fatigue tests overlaps with the results of previous work with different materials, different thicknesses and different welding types [1, 13].

Table 6 Fatigue test numeric results

Sample No	Force (kN)	Stress weld center (MPa)	As welded (Cycle)	Vibratory treated (Cycle)
1	2.3	330	49 500	250 000
2	2	280	140 000	390 000
3	1.6	225	350 000	900 000
4	1.25	175	550 000	1 500 000

4. CONCLUSIONS

Tensile test results show that yield strength, tensile strength and elasticity modulus of the vibratory stress relieved samples have higher values than the as welded samples. Vibratory treatment after welding enhanced the material's toughness because of the increase in elasticity modulus. Also it was observed that the two parameters have different displacement behavior under the same load. Hardness was found to be higher in the front and the back of the plates, that caused the increase in the strength of welded. Residual stress values were observed less on the front and the back surfaces of plate according to Magnetic Barkhausen noise measurement. After vibratory treatment, the fatigue lives of the test samples increased due to the increasing the elastic modulus and decreasing the residual stress in the weld zone. Thus, the VSR method could be used to increase the fatigue life of the large welded structures which are working under heavy cycling loads to some extent.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank to HIDROMEK A.S. and MAN Turkey companies which contributed to this research work by supplying equipment, test materials and technical supports.

REFERENCES

- [1] A. S. M. Y. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker, "The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: a comparison with thermal stress relief", Journal of strain analysis, vol. 37-4, 2001.
- [2] M. Vural, Materials and processes in manufacturing. 9nd ed., İstanbul, 2003.
- [3] H. İ. Yelbay, "Tahribatsız yöntemlerle kalıntı gerilim ölçümündeki gelişmeler", 3rd International Non- Destructive Testing Symposium and Exhibition, İstanbul, April 2008.
- [4] K.J. Kirkhope, R.Bell, L.Caron, R. I. Basu, Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques, Washington, USA, 1997.

- [5] E. Toparlak, "Kaynaklı konstrüksiyonlarda titreşimle gerilme giderme ve uygulamaları", M. Eng. Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey, September 2011.
- [6] E. Taner, Makina Parçalarında Yeni Islah Yöntemleri, Mühendis ve Makina, vol.41-488, 41-46, 2000.
- [7] S.Kwofie, "Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief", Materials science and engineering, A 516 (2009) 154-161.
- [8] M.C. Sun, Y.H. Sun, R.K. Wang, "The vibratory stress relief of a marine shafting of 35# bar steel", Materials Letters 58, 299– 303, 2004.
- [9] Sun, M.C., Sun, Y.H., and Wang, R.K. (2003). Vibratory Stress Relieving Of Welded Sheet Steels Of Low Alloy High Strength Steel, Material Letters 58, 1396-1399.
- [10] S.J.Mehrabadi, M.Azizmoradi, M.M.Emani, "Stress relief and material properties improvement through vibration vs. common thermal method", Journal of solid mechanics vol. 4, pp. 170-176, May 2012.
- [11] Jurius, Valiulis, "Reduce of Material Residual Stresses Using Vibration Energy", in Proc. Of the International Conference Vibroengineering, 2008.
- [12] J. Song, Y. Zhan, "Effect of vibratory stress relief on fatigue life of aluminum alloy 7075-T651", Advances in mechanical engineering, Vol. 8(6) 1-9, May 2016.
- [13] Shankar, S. (1982). Vibratory stress relief of mild steel weldments, Doktora Tezi, Oregon Üniversitesi, ABD
- [14] Rao, D., Ge, J., and Chen, L. (2004). Vibratory Stress Relief in Manufacturing the Rails of a Maglev System, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126, 388-391.
- [15] Rao, D., Wang, D., Chen, L., B, and Ni, C. (2007). The Effectiveness Evaluation of 314L Stainless Steel Vibratory Stress Relief by Dynamic Stress, International Journal of Fatigue, 192-196.

Mehmet Yüksel
İmalat. Müh.
Atılım Üniversitesi, Ankara

Ezgi Kılınc
İmalat. Müh.
Atılım Üniversitesi, Ankara

Server Kanberlioğlu
İmalat. Müh.
Atılım Üniversitesi, Ankara

Boran Güneri
İmalat. Müh.
Atılım Üniversitesi, Ankara

Bilgin Kaftanoğlu
Prof. Dr.
ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara

Şakir Baytaroğlu
İmalat. Müh.
Atılım Üniversitesi, Ankara

Tuğçe Hacaloğlu
ATILIM Üniversitesi
Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara

Taşınabilir Hafif Yüzey Taşlama Makinasının Tasarım ve İmalatı

Bu çalışmada laboratuvar kullanımı için hafif, portatif yüzey taşlama makinasının tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Taşlanacak parçaların tutulması için manyetik tabla kullanılmıştır. Makinanın x, y ve z eksenlerindeki hareketi kontrol için (CNC) teknolojisi uygulanmıştır. Makinanın gövdesinde balpeteği ve metalik malzeme kullanılarak hafiflik ve esnemezlik artırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi yapılarak sistemin sehim ve gerilme analizi yapılmıştır. Taşlama koşulları altında, en yüksek sehim <0.01 mm olmuştur. Soğutma sistemi kullanılarak parçanın ısınması önlenmiştir. Yapılan deneylerde, taşlanmış parçalar üzerinde düzlemsellik ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve beklenen sınırlar altında kaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Taşlama Makinası, Tasarım, İmalat, Deney, Yüzey Özellikleri

GİRİŞ

Taşlama taşı, sert aşındırıcı parçacıkların organik veya inorganik bağlama malzemeleri ile birleştirilmesiyle üretilmektedir ve taşlama makinalarında yüksek hızlarla döndürülmektedirler. Taşlama taşı, iş parçasının yüzeyine yavaşça temas ettikten sonra referans noktaları elde edilir. Taşlama, talaşlı işlem aşamasından sonra daha iyi bir düzlemsellik ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için kullanılır. Genellikle dökme demirde ve çeşitli çeliklerde kullanılır. Bu malzemeler taşlama makinalarında yaygın olarak kullanılan manyetik tabla tarafından tutulabilirler. Taşlama taşı, taşlanacak olan malzemeye uygun olarak seçilir. Bu sayede, malzemede oluşabilecek olumsuzlukların önüne geçilmiş olunur. Alüminyum, paslanmaz çelik, pirinç ve plastikler taşlama taşını çelik ve dökme demirden daha fazla tıkama eğilimindedir, ancak özel tekniklerle taşlanmaları mümkündür. Taşlama, imalat endüstrisi için çok popüler bir tekniktir. Farklı amaçlar ve uygulamalar için üretilmiş çok fazla sayıda taşlama makinası vardır. Taşlama tekniği

yaklaşık 40.000 yıl öncesinden beri kullanılmaktadır. Kum ve diğer aşındırıcı taşların kullanıldığı taşlar ile malzemelerde boyut küçültme tekniği başlamıştır [1]. İlk taşlama makinası 30 Ağustos 1853'te ABD vatandaşı Samuel Darling tarafından icat edilmiştir [2]. A. R. Reynolds, 5 Mart 1867'de [3] bir metal taşlama makinası geliştirmiştir. Bu makina özellikle yüzey taşlama amaçlı kullanıldı ve o zamanların endüstrisi için çok önemliydi.

“Metal düzlemleyiciler” denilen iyileştirmeler J.H. 1867'de Steenbergh [4] ile tornalama gibi taşlama patenti, A. Thomas tarafından 1867'de aynı anda alınmıştır [5]. Metal plakaların taşlanması patenti 1869'da E.A. Beyaz [6] ve metal taşlama, parlatma için ilk makina patenti J.S. Lane ve J.H. Pitkin [7] tarafından 1870'de alınmıştır. Metal şekillendirme ve presleme makinalarındaki iyileştirmeler, 1874 yılında M. Newman [8] tarafından yapılmıştır. Testere taşlama makinalarındaki gelişmelere ilişkin patent, 1874 yılında H. Disston tarafından alınmıştır [9]. İlk silindirik taşlama makinası J.A. Coleman, 1888'de [10] icat edilmiştir.

İlk yüzey taşlama teorisi, 1889 yılında E.R. Hyde tarafından yüzey taşlama makinasının geliştirilmesinde kullanıldı [11]. G.W. Watnous, 1891 yılında honlama taşlama makinasının yapımında bazı katkılarda bulunmuştur [12]. Yüzey taşlama makinasında ki en iyi geliştirmeler R.C. 1908'de Matthews [13] tarafından yapılmıştır.

Son yüzyıldaki patentler arasında 1920'de George B Vernon [14] taşlama makinalarında patent aldı ve bu makina 1939 yılına kadar geliştirildi. 1935 yılında alınan diğer taşlama makinası patenti Hormel August'a aittir [15]. Ramsay M Bell'in "Kayış tipi Elektrokimyasal Taşlama Makinası" [16] üzerinde patenti vardır. 1992'de Gerd Berner, yüzey taşlama tezgâhı için patent almıştır [17]. 1997 yılında, ilk dikey taşlama makinası Gilbert Filipe Maria Witters, Johannes Petrus, Van Vliet ve Joop Henk Muller [18] tarafından patentlendirildi. 1999 yılında el taşlama makinası Lee Hsin-Chih Chung [19] tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. 2003 yılında ilk taşınabilir taşlama makinası Albert Kleider [20] tarafından patentlendirildi. 2011 yılında Murray David Wilson, Steven David Wilson ve Omer Leon Hageniers [21] tarafından "Taşlama Taşı Traşlanması için Çoklu Dönen Aparat" patenti alındı. 2014 yılında Truong, P. Wiggins, R. & Wiggins, S. Tarafından [22] bir zemin taşlama makinesinin tambur tertibatına dönüş vermek için bir tahrik ünitesi geliştirildi. 2014 yılında Liaw, Y. J. Kalem, S. K. L. & Liao, Y. tarafından [23] pnömatik yüzey taşlama makinası yapılmıştır. Nishimura, Y. tarafından 2015 yılında [24] taşlama makinası için taşlama aparatı ve taşlama methodu geliştirildi. Weber, J. Ribbeck, K. M. & Blasberg, H. tarafından 2016 yılında [25] taşlama makinasını dişli sistemi ile geliştirildi. Wyman, H. yılında 2016 yılında [26] bir diş başlığının bir bölgesinde bir konik dişlinin işlenmesi için yöntem, konik dişlilerin işlenmesi için makine ve bununla birlikte kullanılmak üzere taşlama aleti geliştirildi.

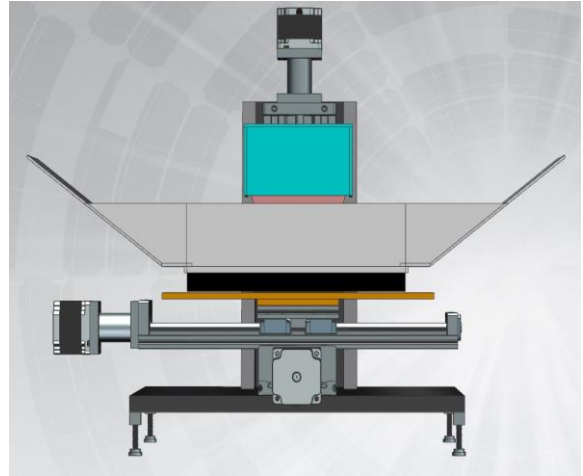
TASARIM GEREKSİNİMLERİ

Taşınabilir hafif bir taşlama makinasının, üç hareket eksenine sahip olacak şekilde tasarlanmasına gerek duyulmuştur. Bunlar, uzunlamasına doğrultuda x eksenine, enine doğrultuda y eksenine ve dikey doğrultuda z eksenidir. Hareket sınırları: x ekseninde 400 mm, y ekseninde 200 mm, z ekseninde 100 mm şeklindedir. Eksenlerin hareketlerini ve taşlama taşının hızını kontrol etmek için bir elektronik CNC sistemi gereklidir. Taşlama sonucu oluşan ısının giderilmesi için bir soğutma sistemine gereksinim duyulmuştur. Soğutma sıvısının masa alanı içerisinde tutmak için bir toplayıcı tepsiye gereksinim duyulmaktadır. Makinanın ağırlığını azaltmak için,

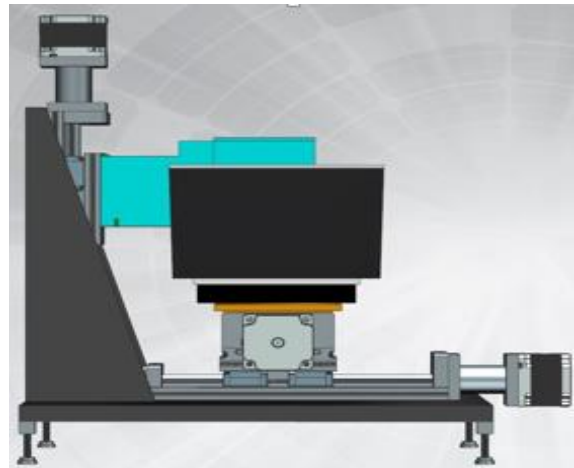
alüminyum ve honeycomb petek gibi kompozit malzemeler kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kullanılacak olan sarf malzemelerin cinsi ve boyutu hafiflik kriterine uygun olacak şekilde üretilmiştir. Yapısal elemanlarda honeycomb petek, motorların bağlantı elemanlarında hafiflik sağlamak için çoğunlukla alüminyum kullanılmıştır.

MODELLEME, ANALİZ ve ALT SİSTEMLERİN TASARIMI

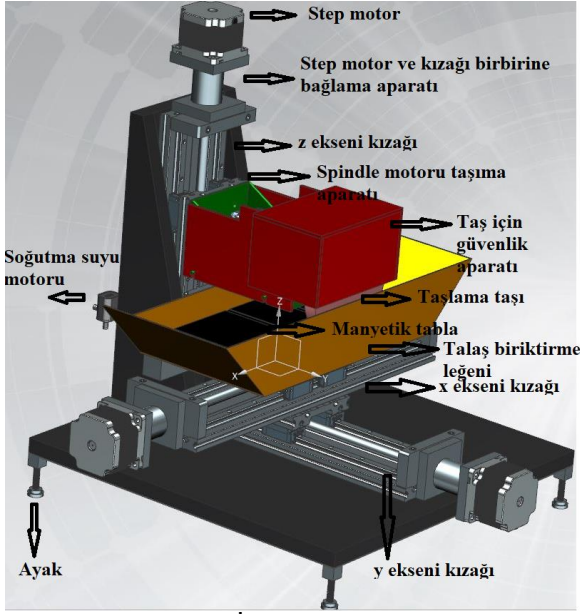
Makinanın amacı taşınabilir ve hafif olmak olduğu için, mümkün olduğunca alüminyum ve honeycomb petek gibi hafif malzemeler kullanılmıştır. Taşlama motorunun destekleri için kullanılan malzemeler sehimi azaltma amacı ile çelikten üretilmiştir. Taşlama makinasının genel tasarımı Şekil 1 ve 2 de gösterilmiştir.



Şekil 1: Önden görünüm



Şekil 2: Yandan görünüm



Şekil 3: İzometrik görünüm

Taşlama Sistemi

EKR Taşlama Taşı: Bu yüzey taşlama taşları alüminyum oksit aşındırıcı parçacıkların seramik bağlayıcıların entegrasyonu ile üretilir. Çelik malzemeler için uygundur.

NK Taşlama Taşı: Bu yüzey taşlama taşları alüminyum oksit aşındırıcı parçacıkların seramik bağlayıcıların entegrasyonu ile üretilir. Çelik malzemeler için uygundur. Taşlama tezgâhlarında tungsten karbür takımların, cam, mermer ve tüm demir dışı metallerin taşlanması için kullanılır.

Taşlama Taşı Hareket Sistemi

Spindle motor, diğer sabit mıknatıslı motorlardan farklı bir motor türüdür. Spindle motorlar, çok ani değişen hareketlere sahiptir ve yüksek ağırlıklar taşıyabilir. Bu nedenle, durma noktasına sahip konum yapıları diğer motorlar kadar hassas değildir. Bu gereksinimleri karşılamak için VFD022EL21A model sürücü seçilmiştir.

Step motorlar, elektrik enerjisini dönen harekete dönüştürmek için kullanılan elektromekanik cihazlardır. Üç eksen çalıştırmak için adım motorları kullanılır. Nema 34 model adım motorları, eksenleri x, y, z yönlerinde hareket ettirmek için M542 (CWD556) model sürücü seçilmiştir.

Doğrusal Hareket Sistemi

Üç eksen için doğrusal hareket modülleri tercih edilmiştir. Bunun sebebi, vidalı tahrik

sistemlerinin (< 0.01 mm) yüksek konumlandırma hassasiyetine sahip olmalarıdır.

Özellikleri:

X eksen için: Doğrusal modül stroku: 400 mm, Hatvesi: 16x16, Hızı: 0.42 m/s

Y eksen için: Doğrusal modül stroku: 200 mm, Hatvesi: 16x5, Hızı: 0.12 m/s

Z eksen için: Doğrusal modül stroku: 100 mm, Hatvesi: 16x5, Hızı: 0.12 m/s

Malzemeleri Tutma Sistemi

Manyetik tabla, taşlama makinasında çelik ve demir parçaları tutmak için kullanılır. 120 Newton/cm²'den fazla manyetik kuvvete sahiptir.

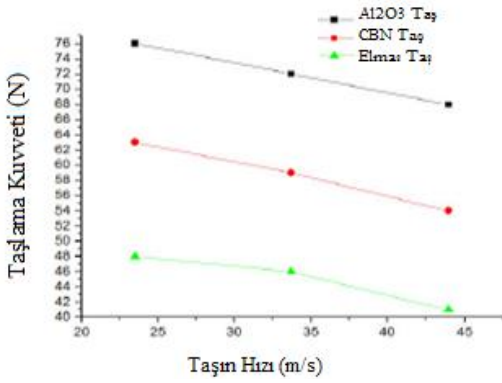
Soğutma Sistemi

Tüm taşlama makinaları soğutma sistemleri ile kullanılmaktadır. Bu sistem, kesme işleminin neden olduğu sıcaklıklar nedeniyle iş parçasının bozulmasını önler. Bu taşlama makinasında sodyum karbonat çözeltisi soğutma sisteminde kullanılmıştır. Alüminyum hariç tüm metallerde sıklıkla kullanılan ucuz bir soğutucu olan sodyum karbonat, 1 galon suda yaklaşık $\frac{1}{4}$ oranda çözülerek (sal soda) oluşturulur. Alternatif olarak, suyla karıştırılan bor yağı da kullanılabilir.

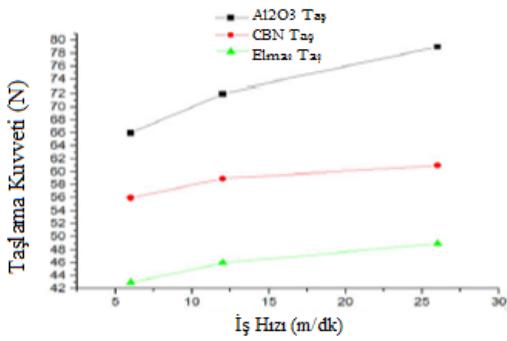
Ayrıca, taşlama taşının üzerine pleksiglas'tan bir koruma sistemi tasarlanmıştır. Manyetik tablanın içerisinde yer alacak bir tepsi modeli, bu modele bağlı su haznesi tasarlanmıştır. Bunun sebebi, soğutma suyunun ve taşlama sırasında oluşan talaşın tepsiye dolduktan sonra hazneye akması ve oluşabilecek iş kazalarının önüne geçmektir. Pleksiglas tercih edilmesinin sebebi, hafif ve şeffaf olmasıdır.

Tasarım Hesaplamaları

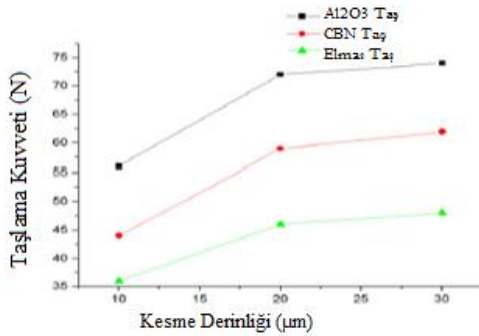
Taşlama taşı hızı, iş parçası hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızının bir fonksiyonu olarak taşlama kuvvetinin değişimi Şekil 4.a, Şekil 4.b, Şekil 4.c ve Şekil 4.d'de gösterilmektedir. Bu grafiklere taşın hızında, iş hızında, kesme derinliğinde ve ilerleme hızında ulaşabileceğimiz en yüksek değerleri öğrenmek için ihtiyaç duyduk. Şekil 4.a'da taşlama taşı 35 m / s hızında hareket etmektedir ve malzemesi Al₂O₃ 'tür. Tasarım hesaplamaları için çok önemlidir. Güç, sehim hesabı, taşlama sırasındaki çalışma süresine karar vermek için Şekil 4.a'da görüldüğü gibi taşlama kuvveti yaklaşık olarak 74 N olarak belirlenir. Kesim derinliği 20 mikrometreden büyük olmamalıdır. Besleme hızı 0,10 m/dk altında olmalıdır.



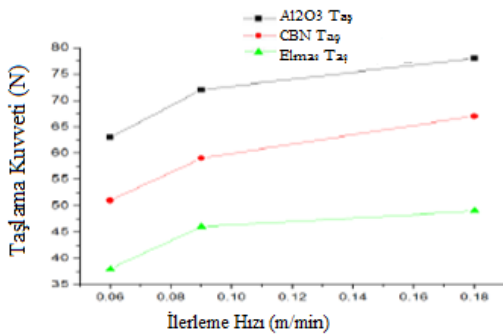
Şekil 4.a: Taşın Hızı ve Taşlama Kuvveti



Şekil 4.b: İş Hızı ve Taşlama Kuvveti



Şekil 4.c: Kesme Derinliği ve Taşlama Kuvveti



Şekil 4.d: İlerleme Hızı ve Taşlama Kuvveti

Şekil 4: Taşlama kuvveti, besleme hızı, kesim derinliği ve ilerleme hızı ile bağlantıları [22].

Talaş Debisi

Talaş debisi, kesim derinliği, besleme hızı ve dönme hızı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Z = f \times a_p \times V_{trav} [23] \dots\dots\dots (1)$$

Z = Talaş Debisi (mm³/s)

f = Besleme Hızı (mm)

a_p = Kesim Derinliği (mm)

V_{trav} = Dönme Hızı (mm/s)

Tipik Parametreler İçin:

$$f = 0.10 \text{ m/dk} = 100 \text{ mm/dk} = 1.66 \text{ mm/s}$$

$$a_p = 20 \text{ µm} = 0.02 \text{ mm}$$

$$V_{trav} = 20 \text{ cm/s} = 200 \text{ mm/s}$$

$$Z = (1.66) \times (0.02) \times (200) = 6.64 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Güç Hesaplamaları

EKR taşlama taşı, 175 mm çapında ve 20 mm genişliğinde seçilmiştir. Makina, çelik malzemeleri taşıyacağından, 2000 - 3000 Knoop Hardness sertliğine sahip [24] alüminyum oksit taşlama taşı seçilmiştir. Bu taşlama taşı, titanyum karbür, silisyum karbür, CBN ve elmas taşlama disklerinden daha ucuzdur.

Seçilen taşlama tekerleğinin çapı 175 mm'dir. Önerilen hız 35 m/s.

S : m/dk

$$35 \text{ m/s} = 2100 \text{ m/dk}$$

$$RPM = \frac{S \times 1000}{\pi \times D} [24] \dots\dots\dots (2)$$

$$RPM = (S \times 1000) / (\pi \times D) = (2100 \text{ m/dk} \times 1000) / (\pi \times 175 \text{ mm}) = 3819 \text{ rpm}$$

Bu nedenle, izin verilen taşlama hızı seçilen taş için güvenlidir.

Motor için gerekli güç:

$$P = F_t \times (V_s \pm V_w) [24] \dots\dots\dots (2)$$

F_t : Teğetsel kuvvet / Taşlama Kuvveti (Şekil 4)

F_n : Normal kuvvet $F_n = m \cdot g$ $F_n = 10.2024 \text{ N}$ (Taşlama taşının ağırlığı)

$$F_t = 74 \text{ N}$$

$$V_s = 35 \text{ m/s}$$

$$V_w = 20 \text{ cm/s (Doğrusal hız)}$$

$$P = 74 \times (35 + 0.2) = 2604 \text{ W} = 2.6 \text{ kW}$$

$$P = 74 \times (35 - 0.2) = 2575 \text{ W} = 2.575 \text{ kW}$$

Özgül Kesme Enerjisi:

Kaynak [23]'den. $W_s/mm^3 \rightarrow 13.6 - 68.2$

P_c = Özgül kesme enerjisi x talaş debisi - $6.64 \text{ mm}^3/s$

$P_c = 13.6 x 6.64 = 90.3 \text{ W}$

$P_c = 68.2 x 6.64 = 452.8 \text{ W}$

Taşlama gücü bu değerler arasında olmalıdır $90.3W < 452.8W \text{ per } mm^3$.

Taşlama Süresi

Taşlama makinasının tablası x ve y yönünde hareket eder. İşleme süresi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$T_m = \frac{b_w}{2 x f x n_r} [23] \dots\dots\dots (3)$$

b_w = Malzemenin genişliği (mm)

f = Besleme hızı (mm)

n_r = İleri-Geri çalışma sıklığı

$b_w = 40 \text{ mm}$

$f = 1.66 \text{ mm/s}$

$n_r = 1$

$T_m = 40 / (2 x 1.66 x 1) = 12.04 \text{ s}$

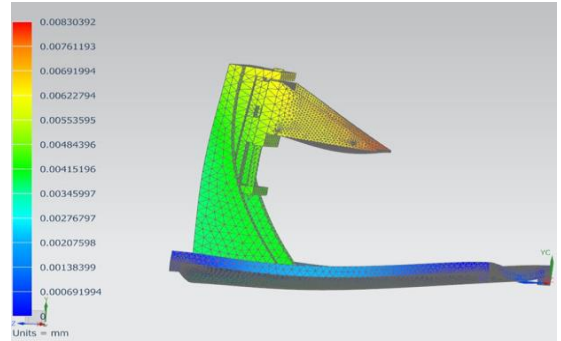
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi bir makinanın üretilmeden önce tasarımlarının gerekli şartları sağlayıp sağlamadığı veya uç limitlerini belirlemek amaçlı kontrol edilmesini sağlar. Taşlama makinesi için kullanılmasının sebebi; fiziksel prototip ve deneylerin sayısını azaltmak ve kullanılacak malzemeleri tasarım aşamasında optimize etmektir. Bu nedenle, biz taşlama makinasının taşlama hassasiyeti için sehim analizi yapıldı. Taşlama makinasının sırt kısmına epoksi yapıştırıcı yardımı ile taşlama taşı için kullanılacak olan spindle motorun taşıma aparatı yapıştırıldı. Z ekseninde oluşabilecek kuvvet sebebiyle sehim en aza indirgenmeye çalışıldı. Tasarım ve sehim hesaplamaları için NX 11 programı kullanılmıştır ve hesaplamalara göre makina için uygun olan malzemelerin seçimi yapılmıştır. İyi bir taşlama makinası 10 mikrondan daha az hataya sahip olmalıdır. Makinamızın sapma değeri ise en fazla 8 mikron olarak hesaplanmıştır.

YÜZEY TAŞLAMA MAKİNASININ İMALATI VE MONTAJI

Alüminyum honeycomb petek paneli dekupaj testeresiyle kesilerek üretime başlanılmıştır. Honeycomb peteğinin yapısal gövdesi nedeniyle delme işlemi uygulanamamaktadır, bu yüzden kesilen parçaları alüminyum honeycomb petek yapısının montaj şekli olan epoksi yapıştırıcı ile bağlandı. Spindle motor tutucusu olarak giyotin ile çelik bir malzeme kesilip kaynak yapıldı. Spindle motorun montajı için çelik üzerinde delikler açıldı.

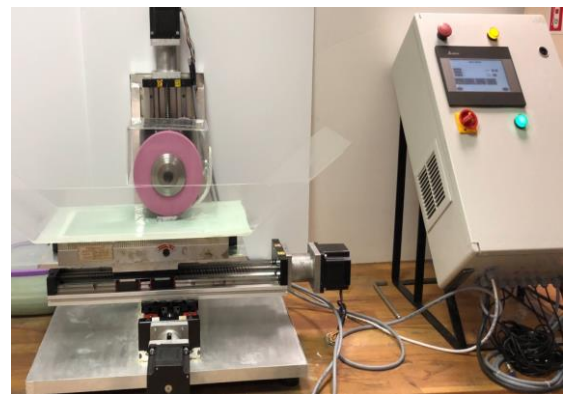
Kaynak ve delme işlemlerinden sonra, taşlama işlemi ile çeliğin yüzeyi temizlendi ve boyandı. Manyetik tabla ve x ekseninde araba arasına alüminyum bir parça üretildi. Bu parça vidalama yöntemi ile linear modülün arabasına monte edildi. Su tankı, koruma kapağı ve manyetik tablanın yerleştirildiği tepsi pleksiglastan üretildi. Motorları ve kızakları bağlamak için flanş kaplinler üretildi. Bu malzemeler yerleştirildi ve aralarına bağlantı elemanları uygulandı. Elektrik paneli, dokunmatik ekran ve elektrikli ekipman özel olarak geliştirildi. Motorlar ve elektrik sistemleri için sağlanan malzemeler bağlandıktan sonra, elektrik panosunun içine yerleştirildi.



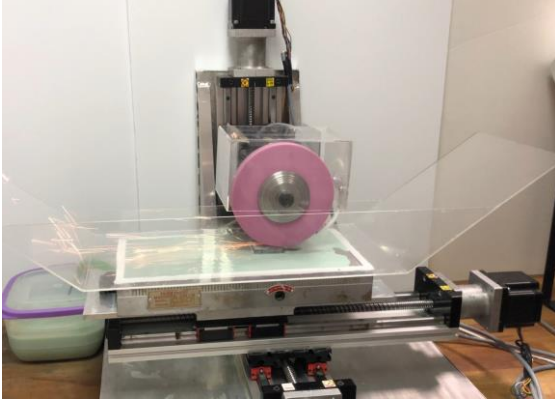
Şekil 5: Taşlama makinasının çalışma konumunda sonlu elemanlar analizi kullanılarak büyütülmüş sehim analizi.

YÜZEY TAŞLAMA MAKİNASININ DENENMESİ

Taşlanan örneklerinin düzlüğünü ve pürüzlülüğünü kontrol etmek için testler yapıldı. Öncelikle elmas uç kullanılarak taşlama taşı düzeltildi. Manyetik tabla üzerine 10 cm ara ile kalınlıkları 10.66 mm olan, başka bir yüzey taşlama makinasında taşlanmış iki blok konuldu. Taşlama işlemi sonucunda kalınlıkları ölçüldü. İkisinin de kalınlığının 10.13 mm olduğu görüldü. Dolayısı ile düzlemsellik hassasiyeti < 0.01 altında olduğu kanıtlandı.



Şekil 6: Taşlama makinası ve kontrol sistemi



Şekil 7: Taşlama makinası çalışma anı

SONUÇ

Laboratuvar uygulamaları için küçük örnekleri taşıyabilmek için portatif ve hafif bir yüzey taşlama makinası tasarlanmış ve üretilmiştir. Hafiflik ve esnemezlik sağlamak için, yapısal parçalarda honeycomb petek ve alüminyum malzemeler kullanılmıştır. Taşlama sırasında parçaları tutmak için bir manyetik tabla uygulanmıştır. Makinanın kızıklarında sonsuz vida ve step motorlar kullanılmıştır. Taşlama taşının hızı, x, y ve z eksenlerini hızları ve tüm hareketleri geliştirilmiş CNC sistemi ile kontrol edilmektedir. Düzlemsellik ve pürüzlülük testleri uygulanmıştır. Makinanın düzlemselliğinin < 0.01 mm altında olduğu görülmüştür. Pürüzlülüğün kullanılan taşlama taşı ile de ilgili olmasına rağmen, bu değer $0.760 \mu\text{m}$ ile $1.140 \mu\text{m}$ arasında olduğu görülmüştür.

Bu şekilde tasarlanan yüzey taşlama makinasının tasarım kriterlerine uyduğu gözlemlenmiştir.

DESIGN AND MANUFACTURING OF A PORTABLE LIGHTWEIGHT GRINDING MACHINE

A new portable and lightweight grinding machine is designed and manufactured to grind metallic specimens for laboratory environment. It uses a magnetic table for holding the parts. A three axes CNC control is developed for control of the grinding process. The structure of the machine is built using honeycomb and metallic parts to reduce weight and to provide the required rigidity. Finite Element Method is used for the deflection analysis of the structure. Under grinding conditions, maximum deflection is < 0.01 mm. Coolant system is provided to keep the temperature of the process under control. Experiments on the manufactured machine are conducted and surface measurements on the ground specimens are obtained to measure flatness and roughness.

Keywords: Grinding Machine, Design, Manufacturing, Experiments, Surface Properties

TEŞEKKÜRLER

Yazarlar, ATILIM Üniversitesi, ARGEDA-TTO'ya ATÜ-LAP-1819-08 proje numarası ile verdikleri desteğe, İmalat Mühendisliği Bölümüne, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne, imalatın yapılması için sağlanan olanaklar ve teknisyenler Bülent Aydoğan ve Nevzat Mert Duman'a sağladıkları destek için teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Lynch, A. J. & Rowland, C. A. (2005). The history of grinding. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
2. Darling, S. (1853). U.S. Patent No. US9976A. "Apparatus for Grinding and Shaping Metals" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
3. Reynolds, A. R. (1867). U.S. Patent No. US62566A. "Machine for Grinding Metal Plates" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
4. Steenbergh, J. H. (1867). U.S. Patent No. US70479A. "Improvement in Metal Planers" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
5. Thomas, A. (1867). U.S. Patent No. US70483A. "Lathe Way Smoother" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
6. White, E. A. (1869). U.S. Patent No. US96066A. "Grinding Metal Plates" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
7. Pitkin, J. H., & Lane, J. S. (1870). U.S. Patent No. US108822A. "Machine for Grinding & Polishing Metal" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
8. Newman, M. (1874). U.S. Patent No. US151669A. "Improvement in Metal Shaping & Pressing Machines" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
9. Disston, H. (1874). U.S. Patent No. US156989A. "Improvement in Saw Grinding Machines" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
10. Coleman, J. A. (1888). U.S. Patent No. US376814A. "Golem an Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
11. Hyde, E. R. (1889). U.S. Patent No. US405706A. "Surface Grinding or Planning Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

12. Watnous, G. W. (1891). U.S. Patent No. US453297A. "Honing Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
13. Matthews, R. C. (1907). U.S. Patent No. US876372A. "Surface Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
14. Vernon, G. B. (1920). U.S. Patent No. US1412725A. "Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
15. August, H. (1935). U.S. Patent No. US2055351A. "Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
16. Bell, R. M. (1966). U.S. Patent No. US3448023A. "Belt Type Electro-chemical (or Electrolytic) Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
17. Berner, G. (1992). U.S. Patent No. US5398454A. "Surface Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
18. Witters, G. F. Petrus, J., Vliet, V., & Muller, J. H. (1997). "Grinding Machine" C.A. Patent No. CA2291264A1. Canada.
19. Chung, L. H. (1999). U.S. Patent No. US6110028A. "Retarding Device of a Grinding Machine" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
20. Kleider, A. (2003). U.S. Patent No. US7014547B2. "Portable Grinding Machine With Protective Cover" Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
21. Wilson, M. D. Wilson, S. D. & Hageniers, O. L. (2011). "Multiple Spinner Carousel for Dressing a Grinding Wheel" U.S. Patent No. USD665830S1. Everett, WA (US), Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
22. Truong, P. Wiggins, R. & Wiggins, S. (2014). "Drive System for orbital grinder" U.S. Patent No. US9604341B2. Taoyuan County (TW), DC: U.S. Patent and Trademark Office.
23. Liaw, Y. J. Kalem, S. K. L. & Liao, Y. (2014). "Pneumatic machine tool" U.S. Patent No. USD740635S. Tokyo (JP), DC: U.S. Patent and Trademark Office.
24. [24] Nishimura, Y. (2015). "Grinding apparatus and grinding method" U.S. Patent No. US10286520B2. Zürich (CH), DC: U.S. Patent and Trademark Office.
25. [25] Weber, J. Ribbeck, K. M. & Blasberg, H. (2016). "Method for operating a gear cutting machine" U.S. Patent No. US10185302B2. Klingelnberg AG, Zürich, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
26. Wyman, H. (2016). "Method for finish machining of a bevel gear in a region of a tooth head, machine for machining bevel gears, and grinding tool for use in association therewith" U.S. Patent No. US10252360B2. Zurich (CH), DC: U.S. Patent and Trademark Office.
27. Mahamani A. & Jawahar S. (2018). "Influence of grinding parameters on grinding force and temperature in grinding of AA6061-TiB2/ZrB2 in-situ composite". The 3rd International Conference on Materials and Manufacturing Engineering 2018, Tamilnadu, India, p. 1-7.
28. Boothrdyd G. & Knight W.A. (1989). "Fundamentals of machining and machine tools", ISBN: 0-8247-7852-9, Marcel Dekker, New York.
29. Trent E. & Wright P. (2000). "Metal Cutting", ISBN 0-7506-7069-X, Butterworth-Heinemann, Boston.

Bariş Çetin

Kıdemli Lider Malzeme ve Özel İşlemler
Mühendisi
cetin.baris@fnss.com.tr

FNSS Sav. Sis. AŞ
Gölbaşı / Ankara

Eren Billur

Dr. Öğretim Üyesi
eren@billur.com.tr

Atılım Üniversitesi
Gölbaşı / Ankara

Besim Baranoğlu

Dr. Öğretim Üyesi
besim.baranoğlu@atilim.edu.tr

Atılım Üniversitesi
Gölbaşı / Ankara

Türkay Muratoğlu

Araştırma Mühendisi
turkay.muratoglu@atilim.edu.tr

Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme
Mükemmeliyet Merkezi
Gölbaşı / Ankara

Murat Mutlu Yılmaz

Lisans Öğrencisi

Atılım Üniversitesi
Gölbaşı / Ankara

Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Bükümünde Geri Esneme Açısının Görüntü İşleme ile Belirlenmesi

Yüksek dayanımlı çeliklerin büküm işlemlerinde geri esnemenin hassas bir şekilde ölçülebilmesi gereklidir. Elde edilen son geometri, geri esneme miktarına bağlıdır. Geri esnemedeki yanlış bir tahmin, bükme kuvveti hesabında da yanlışlıklara neden olabilecektir. Bu nedenle, özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde, geri esneme açıları deneysel çalışmalarla doğrulanmalıdır. Bir çok deneysel çalışmada, ancak yük kalktıktan sonraki açı ölçülebilmekte, geri yaylanma buna göre hesaplanmaktadır. Bu çalışmada ise, yüksek mukavemetli çeliklerde bükme açılarının yük altında ve yük kalktıktan sonra belirlenmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Deney düzeneğinde bir video kamera ile tüm büküm prosesi boyunca numunenin görüntüleri kaydedilmiştir. Özel bir Matlab kodu ile bu görüntülerden; parçanın, pres alt ölü noktadayken (maksimum yük anı) ve pres tamamen kalktıktan sonraki (geri esneme sonrası) açıları belirlenmiştir. Sonuçlar, hem manuel yöntemlerle, hem de sayısal simülasyonlarla kıyaslanmıştır. Görüntü işleme yönteminin manuel yöntemlerle oldukça yakın sonuçlar verdiği ve simülasyon sonuçlarında %20'ye varan iyileşme sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Dayanımlı çelikler, Geri Esneme, Görüntü İşleme.

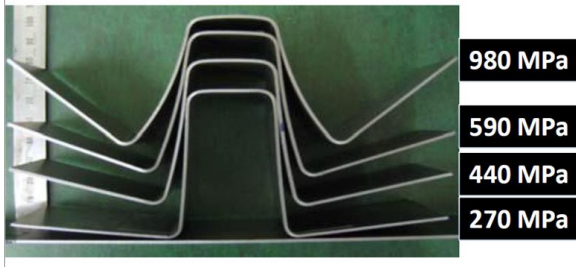
1. GİRİŞ

Zırhlı muharebe araçlarının gövde imalatında, işlem zincirinin üç ana adımı vardır. Bunlar sırasıyla lazerle kesme, bükme ve kaynaklı birleştirmedir. İlk adım olarak, genellikle büyük boyutlu plakalar (örn. 9m x 3m) olarak tedarik edilen gövde malzemesi, istenen boyutlarda lazer ile kesilir. Daha sonra, plakalar teknik çizimlere göre yüksek tonaj kapasiteli (örn. 2000 ton kapasiteli) abkant preslerde bükülür. Büküm sonrası boyutsal toleransların tutturulması için geri esneme açısının doğru tahmin edilebilmesi gerekmektedir. Çoğu zaman, bu durum çok sayıda deneme yanılma yapılmasına neden olmaktadır. Bu süreç hem maliyet artırıcı hem de proje planlamasını aksatıcı bir nitelik taşıyabilmektedir. Fakat geri esnemenin doğru tahmin edilmesiyle birlikte tek

seferde teknik resim toleranslarına uygun olarak bükülmüş olan zırh plakaları, hızlı bir şekilde gövde üretimi için kaynak atölyesine sevk edilebilmektedir.

Otomotiv veya ağır iş makineleri endüstrilerinin aksine, zırhlı muharebe araçlarında kullanılan malzemeler, çok daha kalın ve çok geniş boyutlara sahiptir. Zırhlı muharebe araçlarının imalatında kullanılan ultra yüksek dayanımlı çelik plakaların kalınlıkları bazı durumlarda 35 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca, bükülecek plakaların uzunluğu da 8 metreyi geçebilmektedir [1]. Kolaylıkla tahmin edilebileceği üzere, bu kalınlıkta ve uzunluktaki yüksek dayanımlı çeliklerin bükülmesi için çok yüksek pres kuvvetleri gerektirmektedir. Buna ek olarak, teknik çizimlerde tanımlanan boyutsal toleransların yakalanabilmesi,

dayanım arttıkça artan geri esneme nedeniyle zorlayıcı bir görevdir. Yüksek dayanımlı çeliklerin temel özellikleri yüksek akma gerilmesidir (Yield Stress, $R_{p0.2}$). Bir başka deyişle, yüksek dayanımlı çelikler bükülme işleminde, konvansiyonel yumuşak çeliklere (mild steel) kıyasla daha fazla elastik gerinim (elastic strain) taşımaktadırlar [2]. Bu nedenle yük kaldırıldığında tüm elastik gerinim geri kazanılacağından, yüksek mukavemetli çelikler (özellikle de zırh çelikleri), daha fazla geri esneme göstereceklerdir. Farklı dayanım değerlerine sahip çeliklerin artan geri esneme seviyeleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Malzemenin dayanımı arttıkça geri esneme eğilimi de artar.

Geri esneme eğilimi, gelişmiş yüksek dayanımlı çeliklerin şekillendirilmesi alanında birçok araştırma grubunun odaklandığı bir araştırma alanıdır [3-5]. Otomotiv ve zırhlı personel taşıyıcılar da dahil olmak üzere, birçok sektörde ağırlık azaltma çalışmaları amacıyla kullanılan çeliklerin dayanımları giderek artmaktadır. Çelik üreticilerinin geliştirip pazara sunduğu hem yüksek süneklige, hem de yüksek dayanımına sahip yeni nesil çelikler ile zorlayıcı tasarımlarda da (karmaşık geometrilerde) yüksek dayanımlı çelikler kullanılabilir hâle gelmiştir. Bu durum, geri esneme tahminini daha da zorlaştırmaktadır.

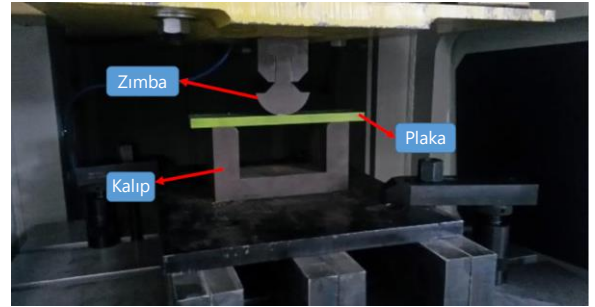
Geri esneme, tanımı gereği, maksimum yük altındaki geometri ile, yük kaldırıldıktan sonraki geometri arasındaki farktır. Geri esneme hesaplarının deneysel doğrulamasında sadece yük kalktıktan sonraki açılar kıyaslanabilmektedir. Pres alt ölü noktadayken (AÖN, bottom dead center, BDC) plakanın açısı, teknik çizime ya da simülasyon sonuçlarına göre tahmin edilmektedir. Bu da geri esneme miktarında büyük bir belirsizliğe neden olmaktadır. Plaka kalınlığındaki (tolerans dahilinde) farklılıklar, kalıp radyuslarındaki aşınmalar ve/veya presin alt ölü nokta tekrarlanabilirliği gibi değişkenler nedeniyle, yük altı büküm açıları hesaplanandan ve deneysel tekrarlarla farklılık gösterebilir. Bu nedenle geri esneme miktarının doğru tahmini için yük altındaki büküm açılarının da ölçülebilmesi gerekmektedir. Bu sayede, yük kalktıktan sonraki

büküm açısı ile aradaki açı farkı kesin ve net olarak ölçülebilir.

Bu çalışmada, modüler bir büküm kalıbında, pres alt ölü noktadayken ve yük kalktıktan sonraki büküm açılarını görüntü işleme yöntemi ile ölçülebilen bir sistem geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, yüksek dayanımlı zırh çeliklerinin farklı kalıp radyusları altındaki bükme açıları incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Büküm deneyleri Atılım Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde bulunan Komatsu marka 80 tonluk servo-mekanik preste yapılmıştır. Zırh çeliğinden üretilmiş deneysel büküm plakaları geleneksel havada bükme (air bending) yöntemiyle bükülmüştür. Geleneksel yöntemde servo pres sürekli aynı hızda kullanılarak tüm kurs boyunca (130 mm) mekanik pres gibi davranması sağlanmıştır. Servo presin veri toplama ünitesi ile, krank açısı, anlık kurs, kuvvet ve hız gibi veriler kaydedilmiştir. Buna ek olarak tüm proses yüksek-çözünürlüklü bir kamera ile de kayda alınmıştır. Şekil 2 ve 3’te deneysel kalıp ve servo presteki kurulumu görülebilir.



Şekil 2: Plaka büküm kalıbının servo prese bağlı hâli.



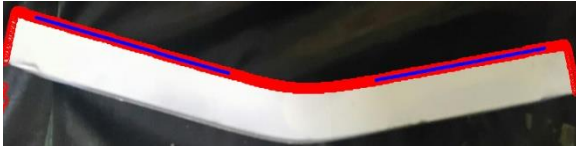
Şekil 3: Yüksek-çözünürlüklü video kayıt sistemi.

Video kamera tarafından saniyede 60 kare fotoğrafı yapıldığından, presin alt ölü noktadayken ve kalıp açıldıktan sonraki anlardaki görüntüler rahatlıkla elde edilebilmektedir. Daha sonra bu anlık görüntü kareleri, MatLab yazılımında

özel olarak geliştirilen bir görüntü işleme kodunda analiz edilmiştir.

MatLab kodunun başarması gereken ilk işlem büküm plakasını, çevresindeki diğer tüm görüntülerden ayırabilmektir. Bu amaçla “eşikleme” tekniği (thresholding) kullanılmıştır. Eşikleme işleminde renkli resimdeki belli kırmızı, mavi ve yeşilin altında ya da üstünde olan yerler 1 ve 0 olarak kodlanır. Bu sayede görüntüde istenen yerler ve istenmeyen arka plan ayrılabilir. İşlem özellikle yüksek kontrast olan görüntülerde daha iyi sonuç verdiğinden [6], plakalar fosforlu renklere (beyaz ya da yeşil) boyanarak arka plandan ayrılmalrı sağlanmıştır.

Plakanın koordinatları arka plandan ayrıldıktan sonra, MatLab kodu plakanın üst yüzeyini hesaplamaktadır. Üst yüzeyin tamamı Şekil 4 ve 5’te kırmızı dairelerle işaretlenmiştir. Büküm plakasının radyusa yakın bölgeleri ve kenarlara yakın olan tarafları dışarıda bırakılacak şekilde, büküm plakasının düz alanları belirlenmektedir. Bu alanlar da, Şekil 4 ve 5’te mavi noktalarla gösterilmiştir. En son olarak mavi noktalara iki adet doğrusal eğri oturma (linear curve fitting) işlemi yapılır. İki eğrinin arasında kalan açı da MatLab kodu tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır (bkz. Şekil 5).

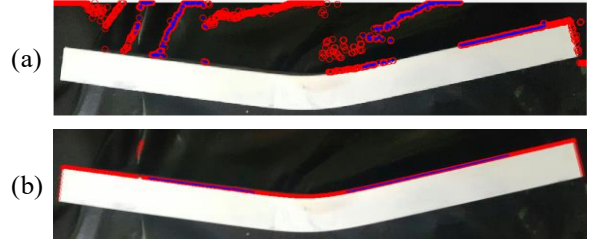


Şekil 4: 20 mm kalınlığındaki plaka için eşikleme yöntemi.



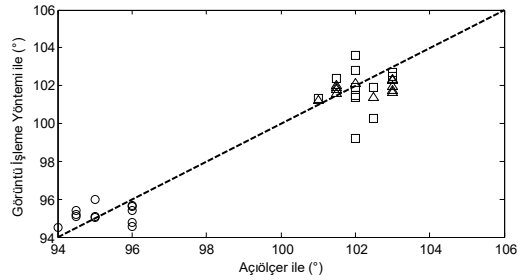
Şekil 5: 12 mm kalınlığındaki plaka için eşikleme yöntemi ile açı hesaplaması.

Görüntü işleme sistemi 1 mm için 4 ila 5 piksel görüntü almaktadır. Bu durumda, Şekil 4 ve 5’te görüldüğü üzere, kenarları boyanmış plakalarda doğru bir eşik değeri seçilebildiğinde MATLAB kodu plakanın üst yüzeyini büyük bir hassasiyetle ($\pm 0,20-0,25$ mm) seçebilmektedir. Mevcut durumda eşik değerleri birkaç deneme yanılma ile belirlenmektedir. Yanlış seçilen eşik değerleri, kenarların doğru hesaplanamamasına ve sonuç olarak da lineer eğrilerin yanlış çıkmasına neden olmaktadır. Aynı görüntünün, farklı eşik değerleri ile çıkarabileceği farklı sonuçlar Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6: Eşikleme yöntemi çıktıları: (a) uygun olmayan eşik değeri ile, (b) uygun eşik değeri ile.

Yöntemin tekrarlanabilirliği ve manuel ölçümlerle kıyaslanması, daha önceki bir çalışmada kanıtlanmıştır, bkz. Şekil 7 [8] Ancak bir önceki çalışmada eşikleme yöntemi ve MATLAB kodu yerine manuel yöntemler kullanılmıştır.



Şekil 7: Görüntü işleme yönteminin açıölçer ile kıyaslanması [8].

3. DENEYLER

Belirtilen test kalıbı ve yöntemle 12 ve 20 mm kalınlıkta ayrı kalitelere sahip zırh plakaları bükülmüştür. Malzemelerin yaklaşık değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

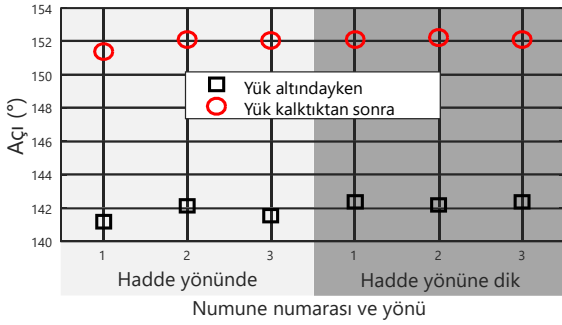
Tablo 1: Kullanılan zırh çeliklerinin mekanik özellikleri.

	Malzeme 1	Malzeme 2
Kalınlık (mm)	20	12
Akma Dayanımı (MPa)	>1100	800-1000
Çekme Dayanımı (MPa)	1250-1550	900-1350
Toplam Uzama A ₅₀ (%)	>12	>12

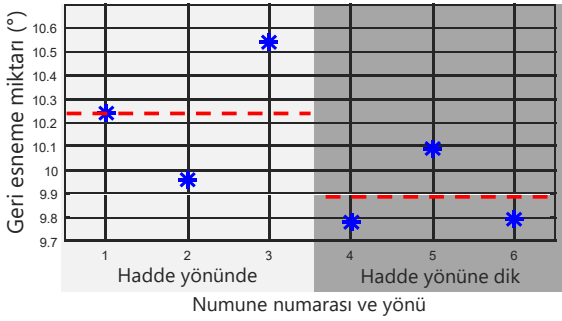
Hem alt ölü noktada (pres tam yük altındayken), hem de yük kaldırıldıktan sonraki açılar hesaplanmıştır, bkz. Şekil 8.

Geri esneme miktarı, iki açının arasındaki farktan hesaplanmış ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Yapılan çalışmadaki 3’er tekrarlar dahi, plaka kalınlıklarındaki değişim, ısıl işlemlerinde oluşabilecek farklılıklar ya da prosesteki değişkenlikle açıklanabilecek farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 9’da kırmızı kesik çizgilerle gösterilen ortalama değerlere göre, hadde yönünde ortalama 10.24°’lik bir geri esneme gözlenirken,

yaklaşık $\pm 2.3^\circ$ 'lük hata payı bulunmuştur. Hadde yönüne dik bükümlerde ise ortalama geri esneme 9.89° , hata payı ise ± 1.85 olarak bulunmuştur.

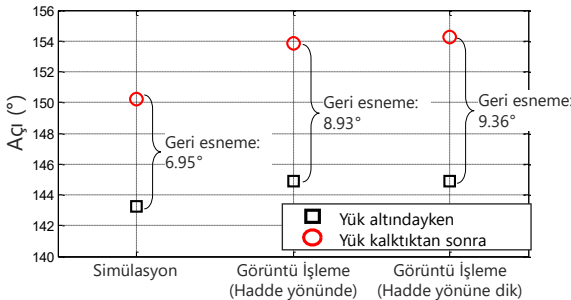


Şekil 8: 20 mm kalınlığındaki zırh plakasının görüntü işleme yöntemi ile hesaplanan büküm açıları.



Şekil 9: MatLab görüntü işleme yöntemi ile hesaplanan geri esneme miktarı (kırmızı çizgiler numune yönlerine göre ortalama geri esnemeyi göstermektedir).

Aynı çalışma 12 mm kalınlıktaki farklı kalitedeki bir zırh çeliği plakasında da yapılmıştır. Şekil 10'da görüleceği üzere, simülasyonla geri esneme miktarı yaklaşık 7° olarak tahmin edilmiştir. Görüntü işleme yöntemi ile farklı yönlerde yaklaşık 9° geri esneme ölçülmüştür. Ayrıca yük altı ve yük sonrası açılarda da 2 ila 4° arasında farklılıklar tespit edilmiştir.



Şekil 10: 12 mm kalınlıkta zırh çeliği plakası bükümünün simülasyon ve görüntü işleme yöntemlerinin kıyaslanması.

Şekil 10 ayrıca görüntü işleme yöntemi kullanılmaması durumunda, simülasyon ile tahmin

edilen yük altı açı ile geri esneme miktarının hata miktarını göstermektedir. Simülasyon datalarının baz alınması halinde gerçekte 9° olan geri esneme $10-11^\circ$ olarak tahmin edilecektir. Bir başka deyişle; geri esneme miktarı yaklaşık 20% hatalı tahmin edilecektir.

4. SONUÇ ve YORUMLAR

- Çeliklerde, dayanım arttıkça geri esnemenin arttığı bilinmektedir. Akma dayanımı 1100 MPa'nın üzerinde olan zırh çeliklerinde 150° 'ye bükümde dahi (düzensellikten 30° 'lik bükümde), yaklaşık 10° geri esneme gözlemlenmiştir.
- Geri esnemeyi hassas bir şekilde hesaplayabilmek için yük altındaki açının da ölçülebilmesi gerekmektedir. Simülasyon ya da ampirik bir yük altı açı hesabına dayandırılan geri esneme hesapları hatalı olmaktadır.
- Yüksek-çözünürlüklü sayısal kamera ile kaydedilen görüntülerden yük altı ve yük sonrası fotoğraflar kolaylıkla elde edilebilmektedir. Geliştirilen MatLab kodu sayesinde, doğru eşik değerleri seçildiğinde açı hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.
- Yöntem, eşik değerine çok bağımlıdır. Yanlış seçilen eşik değerleri, anlamsız sonuçlara neden olmaktadır. Eşik değerinin doğruluğu şu an için manuel olarak yapılabilmektedir. Bunun da otomatik olması için çalışmalar devam etmektedir.
- Çalışma kapsamında, sonlu elemanlar yazılımından da geri esneme hesaplayabilen bir kod tasarlanmaktadır. Bu kod da tamamlandığında, bükme işleminin simülasyonu ve kendisi arasında doğrudan bir kıyas yapılabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Savunma Sanayi Başkanlığı (SSB) FNSS ve Atılım Üniversitesi arasında imzalanan Savunma Sanayi İçin araştırmacı Yetiştirme programı (SAYP) protokolü kapsamında desteklenmiştir. Projeye sağladıkları maddi destekleri için SSB ve FNSS yönetimine teşekkür ederiz. Ayrıca proje kapsamında mevcut altyapısını kullanma imkanını tanıyan Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne de müteşekkirimiz.

Determination of the Spring-Back Angle by Image Processing in Bending of High Strength Steels

Precise determination of the spring-back angle plays an important role in bending of high strength steels (HSS). Since the desired final geometry is totally dependent on the amount of spring-back; any under-estimation would result also in an under-

estimation of the bending force. For that reason, especially in the modelling of HSS bending the spring-back should be verified with experimental studies. This contribution deals with the determination of the spring-back angle in HSS bending operations. To accomplish this, a simple set-up was designed and with the aid of a digital camera the bending process was recorded. A MATLAB script was designed which uses image processing approach for the determination of the angles from the images at the bottom dead center (BDC, i.e., at maximum punch force) and the final position (i.e., after springback). Results were compared with FEA based simulations.

Keywords: High Strength Steels, Springback, Image Processing.

KAYNAKÇA

- [1] Billur, E., Çetin, B., Gürleyik, M., (2016), "New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends and Constraints", International Journal of Scientific and Technology Research, Vol.2 (1), pp 50-62.
- [2] Mulidran, P., Spisak, E., Majernikova, J., Yang S.Y., (2017), "The International Journal of Engineering and Science", Vol.6 (9), pp 49-52.
- [3] Billur, E. And Altan, T., (2012), "Servo-driven presses for AHSS Stamping", Stamping Journal, Nov. Dec. Issue, pp 12-13.
- [4] Zhang, M., Zhang, J., Ning, Y.X., Wang, T., Wan, Z., (2013), "Springback Behavior of Advanced High Strength Steel (AHSS) CP800," Metallic Materials and Manufacturing Technology", Vol.820, pp 45-49.
- [5] Yang, X., Choi, C., Sever, N.K., Altan, T., (2016), "Prediction of Springback in Air-bending of AHSS (DP780) Considering Young's Modulus Variation and with A Piecewise Hardening Function", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.105, pp. 266-272
- [6] Seo, K.Y., Kim, J.H., Lee, H.S., Kim, J., Kim, B.M., (2017), "Effect of Constitutive Equations on Springback Prediction Accuracy in the TRIP1180 Cold Stamping", Metals, Vol. 8, pp.18
- [7] MatLab & Simulink Users' Manual.
- [8] Billur, E., Çetin, B., Yılmaz, M.M., Oğuz, A.G., Atay, A., Ersoy, K., Uğuz, R.O., Kaftanoğlu, B., "Forming of New Generation AHSS Using Servo Presses", Proceedings of 5th International Conference on Accuracy in Forming Technology (ICAFT 2015), pp. 175-192.

Veysel Cenk Karakuz

Endüstri Yüksek Mühendisi, Türk
Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.-TAI,
ANKARA
cenkkarakuz@gmail.com

Özlem Müge Testik

Prof. Dr.

Hacettepe Üniversitesi Endüstri
Mühendisliği Bölümü, ANKARA
ozlemaydin@hacettepe.edu.tr

Estimation of Workload for Aircraft Design Projects By Using Fuzzy Logic

In this study, it is aimed to estimate workload for aircraft design. Actual values of variables are not always reachable due to subjectivity, lack of data, and so on. In this case, forming the model by incorporating fuzzy logic can be a satisfactory solution. In this study, the results obtained by fuzzified aircraft design data from literature were compared with the actual results of the literature. According to comparison results, it is seen that the results of the fuzzy estimation method are close to the actual results. As a conclusion, estimation is practicable by fuzzy variables and satisfactory results can be achieved when inputs are uncertain in aircraft design.

Keywords: Aircraft, Design, Workload, Cost estimation, Fuzzy logic, Fuzzy Estimation

1. INTRODUCTION

An aircraft is defined as a machine that the air provides flying. Designing an aircraft is a crucial process and needs to be managed carefully and meticulously. Through this process, cost and workload are two of the most important issues to be managed and also to be estimated. In estimating the cost and workload of aircraft design projects, the major difficulty is the complexity of measuring the components, which are considered as the inputs of the estimation models. The motivation of this study is the need of dealing with this complexity, caused by lack of information or uncertainties.

Once handling the complexities, there are many estimation techniques that are classified as qualitative and quantitative methods. Qualitative methods generally depend on heuristic principles like complexity, quality, etc. and works with similarities or comparable things of a product previously manufactured whereas quantitative models depend on statistical analysis, deep research about a product, its features or processes [1]. Fuzzy logic is one of the qualitative methods, introduced by Lotfi Asker Zadeh in 1965 to bring an optional perspective to traditional analyses. This method briefly provides problems including uncertainty and vagueness to model with linguistic variables in any system [2].

In this study, fuzzy logic is implemented on aircraft design projects' workload estimations, by using performance and size variables. Cost estimation techniques for aircraft design projects are taken into

consideration and by considering workloads as costs of related projects, workloads are estimated. Selected crisp variables about performance and size variables such as aircraft unit weight, aircraft empty weight, speed and climb rate are defined by using linguistic fuzzy variables. After that, an appropriate Fuzzy Inference System is generated and a comparison of current outcomes gathered from literature and fuzzy outcomes is presented.

2. COST ESTIMATION FOR AIRCRAFT DESIGN PROJECTS

The first successfully flying aircraft was designed by Wright Brothers, in 1903 even if there were some trials for flying in anywhere on earth until that time. Then, once again Wright Brothers has improved an upgraded version by 1905 [3]. This development was source of inspiration to many people and countries for designing new and improving the existing ones.

Design concept can differ in terms of using methods or can be differentiated as tangible or intangible such as product, place, information, and so on [4]. During design process for anything there are many unknown obstacles. Since, it is usually encountered while doing it. Vilecco and Pellegrino [5] stated that it is always faced with vagueness in engineering design and Daalhuizen et al. [6] emphasized also the source of uncertainty as lack of knowledge and proficiency, variances in design changes and its complexity in any given task because of inadequacy of data and knowledge. Moreover,

MacCormack [7] evaluated that changing conditions can appear normally or appear slowly and Bstieler [8] explained that uncertainty in customer side leads to vagueness in project execution which no one is unable to understand. Because of the complexity in design process, cost estimation or prediction of effort during this period is very remarkable.

2.1. Cost Estimation Methods

Cost estimation methods may be classified as qualitative and quantitative [1]. Qualitative methods are ordered as *intuitive* and *analogical methods* that are mainly used in early stage of design because of lack of knowledge [9]. Case-Based Reasoning, Rule-Based, Fuzzy Logic and Expert Systems are the techniques used in intuitive methods. Analogical techniques use Regression Analysis or Back-Propagation Neural-Network in cost estimation. Quantitative cost estimation methods use parametric cost estimation, operation-based, break-down approach, feature-based approach, tolerance-based approach or activity-based approach.

2.2. Aircraft Design

An aircraft design consists of three phases which are conceptual design phase, preliminary design phase and detail design phase that are also shown in Figure 1.

Conceptual design is a kick-off for design but the most crucial one. The major responsibility of this phase is to prepare a guide for bringing together requirements and expected design and system configuration. The decisions about material type, structural design requirements, and support activities are determined [11]. Preliminary design phase is the phase that optimized design alternatives are handled in terms of

cost effectiveness or practicability of design. Design geometry begins to form and system and sub-system of the aircraft also is shaped. Provided that the concept design phase is definite the only minor changes are made for aircraft in this part of the design [12]. The last stage of the design is the detail design phase which systems, sub-systems and parts are defined and designed in all details to be fabricated or sub-contracted. During this phase, whole system and design components are evaluated and analyzed in detail. Manufacturing documentation is released [13]. After finishing the design, manufacturing activities begin for maiden product. Followed by these activities first flight, flight testing, and certification operation proceed.

In any project, workload, defined as effort for one who works for the specific task, is considered at each stage. Therefore, workload is a crucial issue that should be estimated at the beginning of the projects. In terms of design projects, to spend time as working for a task in design activity can be expressed as design workload for the activity [14].

3. FUZZY LOGIC AND FUZZY INFERENCE SYSTEM

Fuzzy logic was first introduced by Lotfi Asker Zadeh in 1965 in order to model complex and uncertain problems that have lack of data or knowledge [2]. Hence, fuzzy logic is an alternative approach to find solution for vagueness in systems. It can be expressed as enlargement of the conventional set theory by adding belongings of elements to fuzzy sets. In classical set theory, element either belongs to a set or not (either zero or one), where fuzzy logic defines membership degrees in defining the belonging of each element to a fuzzy set, where there is no strict boundaries according to fuzzy theory [15].

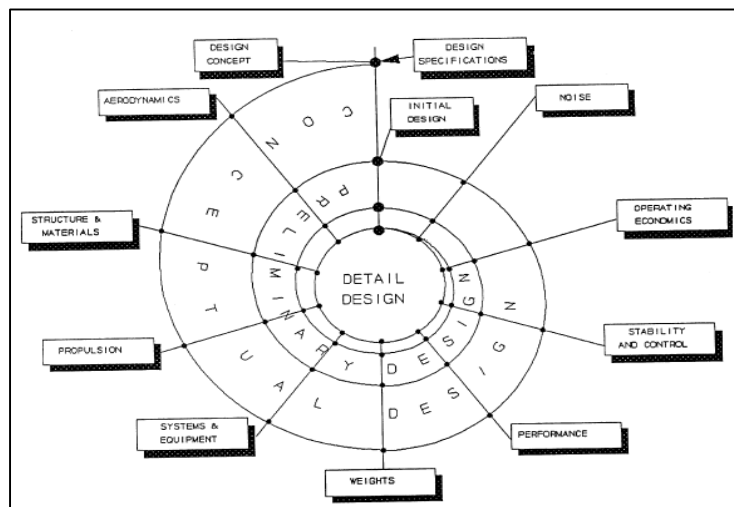


Figure 1. The Design Spiral [10]

There are many applications of fuzzy logic for aircraft. Dobrescu and Balazinski studied environmental control on cabin and cockpit of aircraft [16]. Atlı and Kahraman used fuzzy logic for aircraft maintenance planning as decision making tool [17]. Lo et al. implemented for finding system failures in aircraft. [18]. Liu et al. proposed a model using fuzzy logic about durable flight control system to explore Mars [19].

Fuzzy inference system can be expressed in three major steps which are fuzzification, fuzzy inference engine and defuzzification shown in Figure 2.

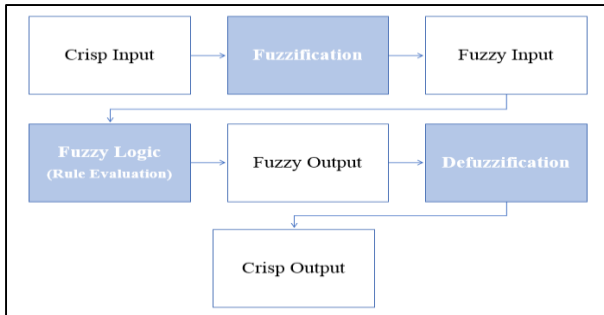


Figure 2. Process of Fuzzy Model

Fuzzification is a process that crisp inputs are converted into linguistic variables. Then, linguistic variables are defined with their fuzzy membership functions using fuzzy sets. Linguistic variables are the input or output terms of the system whose values are differ from numeric values, they are denoted as words or sentences from daily language [20].

Although various membership functions such as singleton, gaussian, trapezoidal and triangular can be defined in fuzzy logic [21], the mostly used types are triangular and trapezoidal fuzzy numbers because of their simplicity in calculation and linearity on membership functions. General mathematical notation of triangular fuzzy number is defined by three real numbers (l, m, u) and they are expressed lower, mid and upper bounds of triangular fuzzy number [22]. The next step is the **fuzzy inference engine** with IF-THEN rules. IF-THEN rules provide conditional situations between inputs and outputs for any model [23]. The last step of process is **defuzzification** where fuzzy values are converted to crisp value by using some methods such as center of gravity (COG) or center-of-area (COA), mean of maximums (MOM), smallest of maximum (SOM) and largest of maximum (LOM) [24].

4. PROPOSED MODEL

As stated in earlier chapters, if there is uncertainty and lack of data in any stage of the process,

fuzzy logic can be used in achieving reliable results. In this study, an aircraft database including 34 military aircraft will be used from literature. These aircrafts' type is examined in 6 categories such as fighter, bomber, transportation, attack, training and business jet.

There are several cost factors that affect aircraft manufacturing. Basically, engineering, tooling, staffing, material, development and manufacturing support, flight test operations and quality control are cost levels of an aircraft development process. Especially, the design phase is more invisible comparing with others. That's why variable selection is important to make model visible. Aircrafts considered in this study are examined according to their characteristics and some dependent variables are determined in terms of size and performance features.

4.1. Inputs for Aircraft Design Workload Estimation

During the modeling phase of this study, many characteristics were considered according to elements of aircraft as possible variables. However, it was important that variables had to satisfy the requirements that are related to cost of aircraft and also had to embody all aircraft' design methodology. Determined variables are; **Climb Rate (CR)**, the vertical maximum climb of the aircraft; **Aircraft Unit Weight (AUW)**, calculated as excluding wheels, brakes, tires, engines propellers, avionics and other systems and sub-systems, (it can also be thought structural weight of the aircraft); **Empty Weight (EW)**, defined as the weight of the aircraft without fuel, ammunition and crew; **Maximum Speed (MS)**, the speed of the aircraft that reaches at any altitude.

4.2. Fuzzification of Proposed Model

Since it is not always possible to achieve actual (crisp) values of variables in real life, it is recommended to substitute them by fuzzified data, which are easier to obtain. In this study, the success of estimations done by using fuzzified data is investigated. Therefore, linguistic data is defined in fuzzifying the inputs in the model. In this process, equal intervals are used and converted to linguistic variables. The determination of intervals depends on the decision maker's choice. Because of the length of range of data, 11 fuzzy linguistic variables, defined as Extremely Low (EL), Very Low (VL), Low (L), Moderate Low (ML), Slightly Low (SL), Moderate (M), Slightly High (SH), Moderate High (MH), High (H), Very High (VH), Extremely High (EH) are used. Table 1. shows fuzzy values of inputs used in this study.

Table 1. Fuzzy Inputs

Linguistic Variable	AUW (lb)	EW (lb)	MS (kn)	CR (ft/min.)	EDH (hr)
EL	[0, 5072, 32479]	[0, 7410, 38677]	[0, 304, 436]	[0, 3400, 8210]	[0, 315934, 784842]
VL	[5072, 32479, 59886]	[7410, 38677, 69945]	[304, 436, 569]	[3400, 8210, 13020]	[315934, 784842, 1253750]
L	[32479, 59886, 87293]	[38677, 69945, 101212]	[436, 569, 701]	[8210, 13020, 17830]	[784842, 1253750, 1722658]
ML	[59886, 87293, 114701]	[69945, 101212, 132480]	[569, 701, 834]	[13020, 17830, 22640]	[1253750, 1722658, 2191567]
SL	[87293, 114701, 142108]	[101212, 132480, 163747]	[701, 834, 966]	[17830, 22640, 27450]	[1722658, 2191567, 2660475]
M	[114701, 142108, 169515]	[132480, 163747, 195015]	[834, 966, 1099]	[22640, 27450, 32260]	[2191567, 2660475, 3129383]
SH	[142108, 169515, 196923]	[163747, 195015, 226282]	[966, 1099, 1231]	[27450, 32260, 37070]	[2660475, 3129383, 3598291]
MH	[169515, 196923, 224330]	[195015, 226282, 257550]	[1099, 1231, 1364]	[32260, 37070, 41880]	[3129383, 3598291, 4067199]
H	[196923, 224330, 251737]	[226282, 257550, 288817]	[1231, 1364, 1496]	[37070, 41880, 46690]	[3598291, 4067199, 4536107]
VH	[224330, 251737, 279145]	[257550, 288817, 320085]	[1364, 1496, 1629]	[41880, 46690, 51500]	[4067199, 4536107, 5005015]
EH	[251737, 279145, 1000000]	[288817, 320085, 1000000]	[1496, 1629, 1000000]	[46690, 51500, 1000000]	[4536107, 5005015, 1000000]

4.3. Rule Evaluation for Proposed Model

Using Matlab software's fuzzy logic toolbox, fuzzy inference system (FIS) is executed by using triangular fuzzy numbers. The FIS process chart for proposed model is presented in Figure 3. In order to clarify the structure of fuzzy variables, triangular membership functions for "very low (VL)" level the

first input A UW is given in Eq. (1). The rest of the inputs and output variables are defined similarly and presented in Figures 4-8.

$$\mu_{VL}(x) = \begin{cases} \frac{(x-5.072)}{(32.479-5.072)}, & 5.072 \leq x \leq 32.479 \\ \frac{(59.887-x)}{(59.887-32.479)}, & 32.479 \leq x \leq 59.887 \\ 0, & o.w. \end{cases} \quad (1)$$

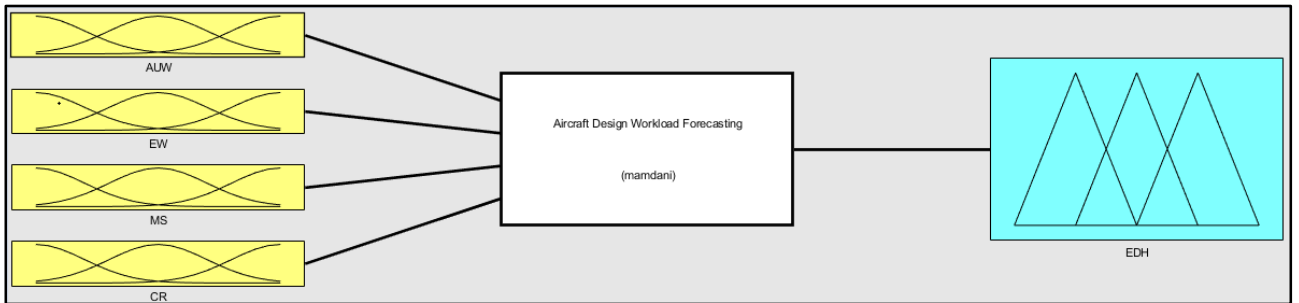


Figure 3. FIS (Fuzzy Inference System) Process Chart

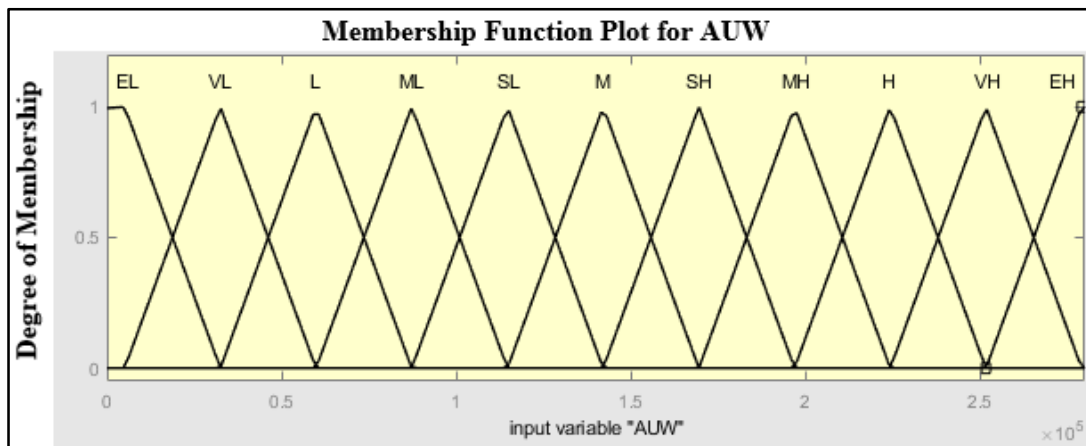


Figure 4. Aircraft Unit Weight (AUW) Membership Function

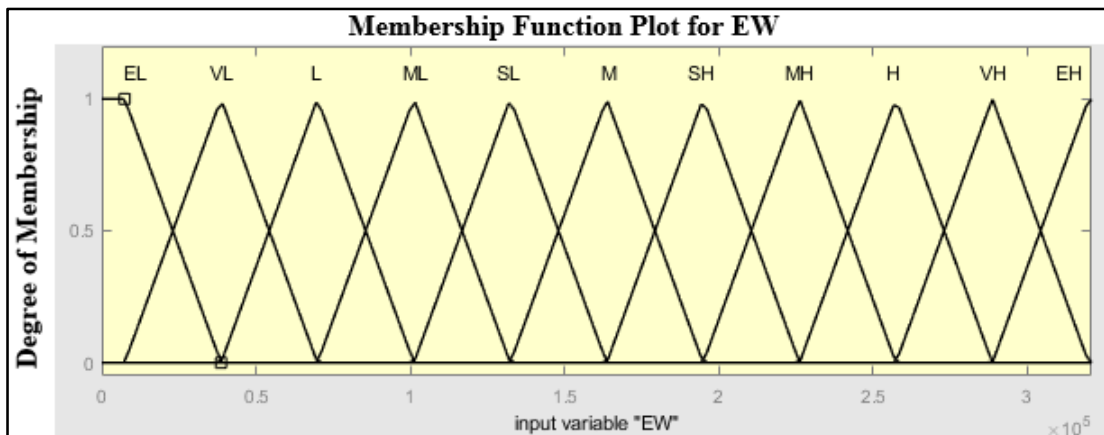


Figure 5. Empty Weight (EW) Membership Function

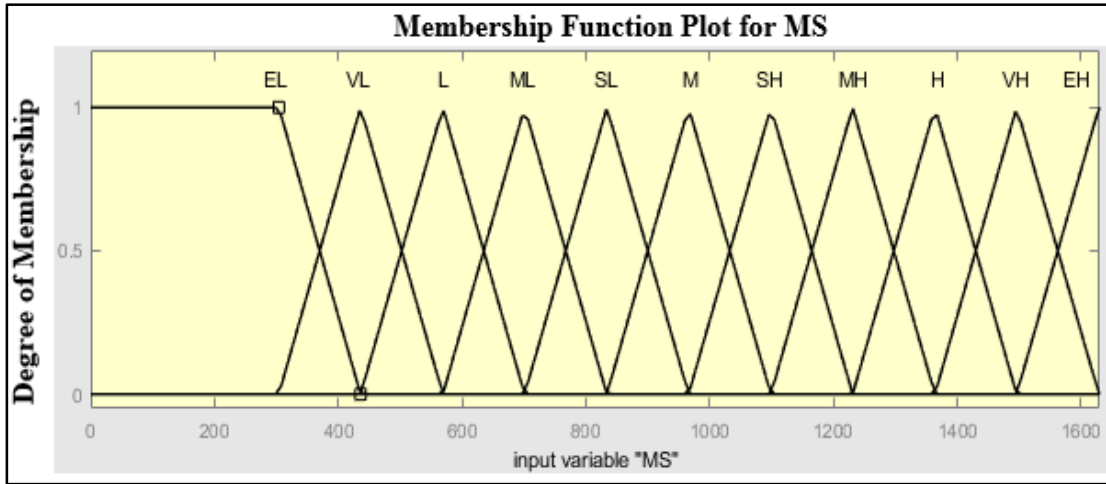


Figure 6. Maximum Speed (MS) Membership Function

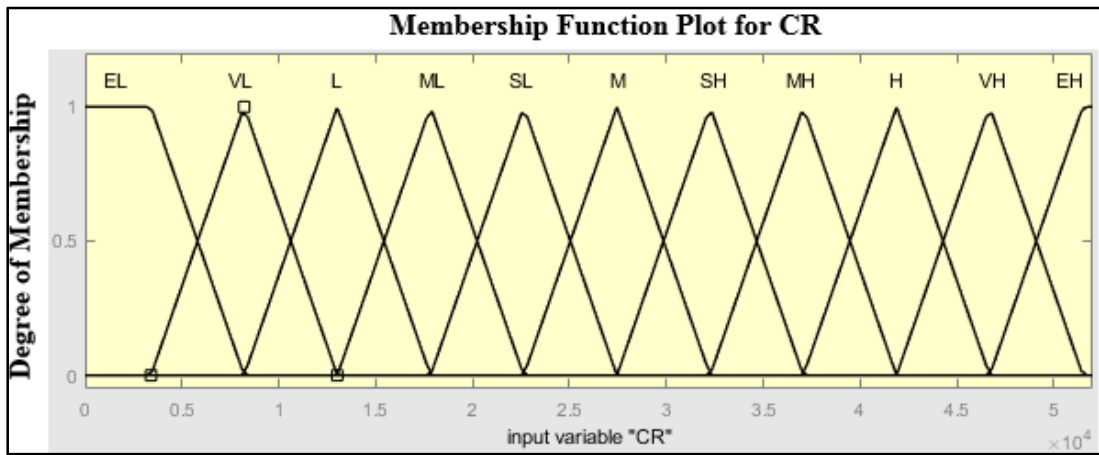


Figure 7. Climb Rate (CR) Membership Function

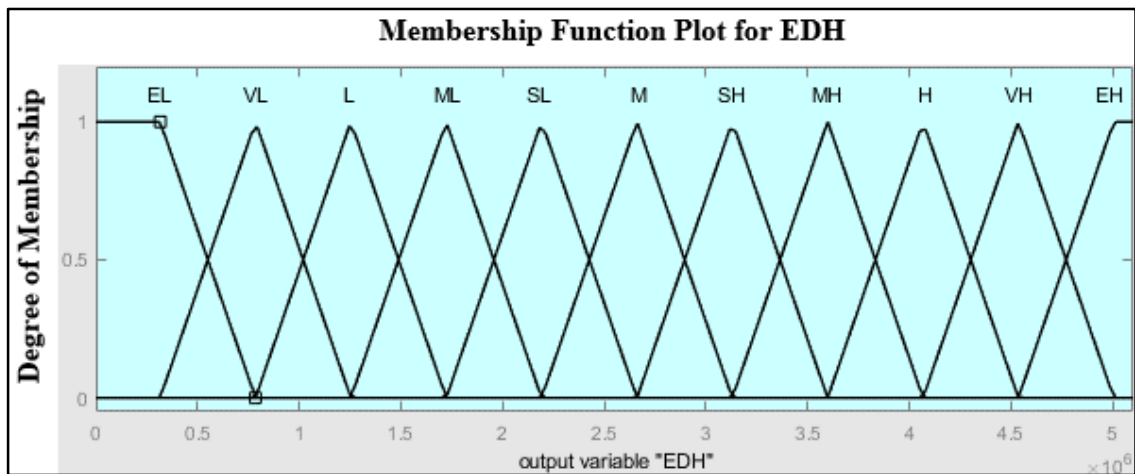


Figure 8. Engineering Design Hours (EDH) Membership Function

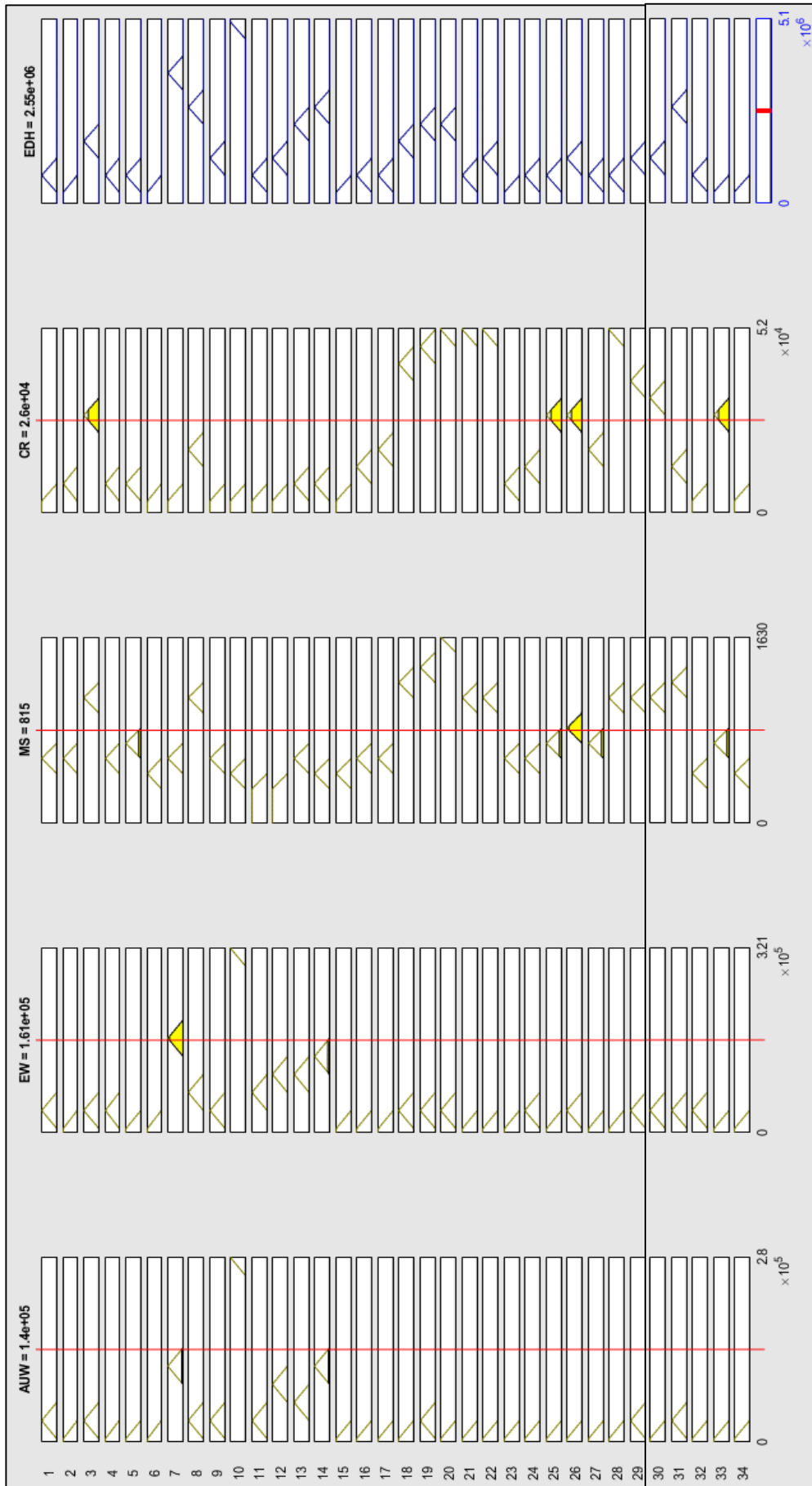


Figure 9. Fuzzy Rule Design

After constructing the fuzzy membership functions for inputs and outputs for the given values in Table 1, totally 34 fuzzy rules are defined. A selected list of the fuzzy rules is as follows:

- 1) If (AUW is VL) and (EW is VL) and (MS is L) and (CR is EL) then (EDH is VL)
- 2) If (AUW is EL) and (EW is EL) and (MS is L) and (CR is VL) then (EDH is EL)
- 3) If (AUW is VL) and (EW is VL) and (MS is SH) and (CR is M) then (EDH is M)
- 4) If (AUW is EL) and (EW is VL) and (MS is L) and (CR is VL) then (EDH is VL)
- 5) If (AUW is EL) and (EW is EL) and (MS is ML) and (CR is VL) then (EDH is VL)

A complete list of rules can be found in [25]. The next step is the defuzzification process, where a crisp

value based on fuzzy numbers and associated membership degrees are calculated. Center of Gravity (COG) is used as defuzzification method to get the crisp value. It determines the center of the area of the integrated membership functions. That means it calculates the centroid or COG of integrated output membership functions. Fuzzy rule design is shown in Figure 9.

5. RESULTS AND CONCLUSION

The current design hours and calculated fuzzy outputs are shown in Table 2. and Figure 10.

Table 2. List of workloads (Current Values and Fuzzy Outputs)

Data	Current Values (hr)	Fuzzy Outputs (hr)	Data	Current Values (hr)	Fuzzy Outputs (hr)	Data	Current Values (hr)	Fuzzy Outputs (hr)
1	1.000.288	983.000	12	1.458.067	1.250.000	23	397.490	430.000
2	355.668	316.000	13	2.093.929	2.190.000	24	726.907	652.000
3	1.803.163	1.660.000	14	2.568.323	2.890.000	25	785.891	709.000
4	779.127	590.000	15	439.897	559.000	26	1.135.161	1.250.000
5	644.754	762.000	16	746.726	783.000	27	754.682	785.000
6	465.280	508.000	17	605.156	785.000	28	805.956	1.020.000
7	3.488.623	3.600.000	18	1.668.815	1.670.000	29	1.400.996	1.330.000
8	2.721.242	2.660.000	19	2.274.788	2.090.000	30	1.386.136	1.250.000
9	1.142.757	1.020.000	20	2.112.966	2.190.000	31	2.566.799	2.660.000
10	5.005.016	4.890.000	21	934.204	1.020.000	32	637.010	596.000
11	915.080	785.000	22	1.146.608	1.020.000	33	365.299	527.000
						34	315.935	416.000

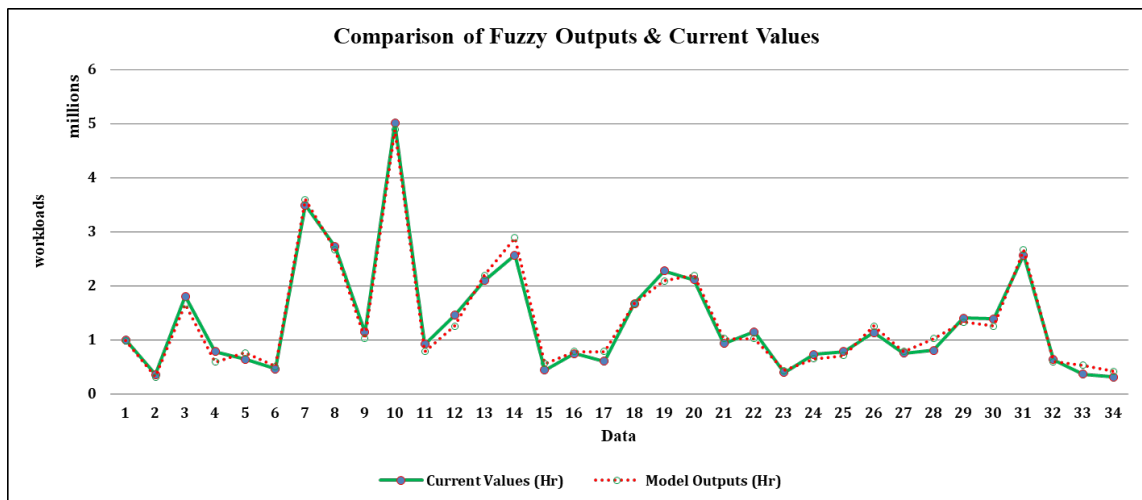


Figure 10. Comparison of Model Outputs and Current Values

Table 2 and Figure 10 present both the current (real) workloads and estimated fuzzy workloads. Comparisons show that fuzzy estimations are closed to actual values. Therefore, in cases where it is hard or impossible to achieve the actual values of components of workload estimation, if the inputs can be classified as linguistic variables such as “extremely low, very low, ..., very high, extremely high”, then a satisfactory estimation can be obtained.

Adding new variables to the model can make more precious results for future studies. Aircrafts' weight can change in terms of material used in the structures. The samples used in this study have mostly metallic material in their structures, where today's aircraft manufacturers mainly use composite material and even lighter for decreasing cost. Therefore, for future aircraft cost estimation models, material will be a meaningful variable for model.

ÖZET

Bu çalışmada hava aracı tasarımında iş yükünün tahmin edilmesi amaçlanmıştır. İş yükü tahmininde değişkenlerin gerçek değerlerine, sübjektiflik, veri eksikliği ve benzeri durumlar nedeniyle ulaşmak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu durumda, modeli bulanık mantık dahil ederek oluşturmak tatmin edici bir çözüm yöntemi olabilmektedir. Bu çalışmada, literatürde bulunan hava aracı tasarım verileri bulanıklaştırılarak sağlanan sonuçlar, literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, bulanık tahmin yönteminin sonuçlarının, gerçek tahmin sonuçlarına yakın değerler olduğu görülmüştür. Buna göre, hava aracı tasarımında girdilerin kesin olmadığı durumlarda, bulanık değişkenler kullanılarak tahmin yapılabileceği ve tatmin edici sonuçlara ulaşılacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava aracı, Tasarım, İş yükü, Maliyet Tahmini, Bulanık Mantık, Bulanık Tahminleme

REFERENCES

1. Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. and Seneviratne, L., Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128 (2006) 2, 563-575.
2. Zadeh, L. A., Fuzzy sets, *Information and Control*, 8 (1965) 3, 338-353.
3. Kiernan, K. M., The Wright Brothers vs. the World: Understanding the Wright Patent Wars, *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 21 (2012) 3, 41-44.
4. Atkinson, P., The Design Journal and the Meaning of Design, *The Design Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 1-4, 2017.
5. Vilecco, F. and Pellegrino, A., Evaluation of Uncertainties in the Design Process of Complex Mechanical Systems, *Entropy*, 19 (2017) 475, 1-8.
6. Daalhuizen, J., Badke-Schaub, P. and Batill, S., Dealing with uncertainty in design practice: issues for designer-centered methodology, *International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 Agust, California*, 147-158, 2009.
7. MacCormack, A., Verganti, R. and Iansiti, M., Developing Products on Internet Time: The Anatomy of a Flexible Development Process, *Management Science*, 47 (2001) 1, 133-150.
8. Bstieler, L., The Moderating Effect of Environmental Uncertainty on New Product Development and Time Efficiency, *Product Innovation Management*, 22 (2005), 267-284.
9. Aram, S., Eastman, C. and Beetz, J., Qualitative and Quantitative Cost Estimation: A Methodology Analysis, *Computing in Civil and Building Engineering, Joint CIB W78 and ICCCBE Conference*, Orlando, 2014.
10. Fielding, J. P., *Introduction to Aircraft Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
11. Gudmundsson, S., *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods And Procedures*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
12. Sadraey, M. H., *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*, Wiley, Chichester, 2013.
13. Raymer, D. P., *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, Princeton University Press, Washington, 1989.
14. Burkimsher, A., Bate, I. and Indrusiak, L. S., A Characterisation Of The Workload On An Engineering Design Grid, *In Proceedings of the High Performance Computing Symposium (HPC '14)*, Tampa, FL, USA, 2014.
15. Lai, Y.-J. and Hwang, C.-L., *Fuzzy Mathematical Programming*, Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 1992.
16. Dobrescu, E. and Balazinski, M., Fuzzy logic aircraft environment controller, *IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information, Processing NAFIPS '04*, Banff, Alberta, Canada, 2004.
17. Atlı, Ö. and Kahraman, C., Aircraft Maintenance Planning Using Fuzzy Critical Path Analysis, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 5 (2012) 3, 553-567.
18. Lo, C. H., Fung, E. H. K. and Wong, Y. K., Intelligent Automatic Fault Detection for Actuator Failures in Aircraft, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 5 (2009) 1, 50-55.
19. Liu, Y., Yao, K. and Lu, Y., Research on fuzzy logic control methods for Mars airplane, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 86 (2014) 5, 415-422.

20. Ross, T. J., *Fuzzy Logic With Engineering Applications*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004.
21. Klir, G. J. and Yuan, B., *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*, USA: Prentice Hall, 1995.
22. Ziauddin, Kamal, S., Khan, S. and Nasir, J. A., A Fuzzy Logic Based Software Cost Estimation Model, *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 7 (2013) 2, 7-16.
23. Novák, V. and Lehmke, S., Logical structure of fuzzy IF-THEN rules, *Fuzzy Sets and Systems*, 157 (2006) 15, 2003-2029.
24. Naaz, S., Alam, A. and Biswas, R., Effect of different defuzzification methods in a fuzzy based load balancing application, *International Journal of Computer Science Issues*, 8 (2011) 5, 261-267.
25. Karakuz, V. C., Fuzzy Forecasting Of Workload For Aircraft Design Projects, Master's Thesis, Graduate School of Science and Engineering of Hacettepe University, 2019.

Derviş Berk Cönger
Mak. Yük. Müh.

Uğur Emiroğlu
Mak. Yük. Müh.

Alper Uysal
Doç. Dr.

Erhan Altan
Prof. Dr.

Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul

Alüminyum 6061 Malzemenin MQL Yöntemi ile Frezelenmesinde Nano MoS₂ Katkılı Kesme Sıvısı Kullanımının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, Alüminyum 6061 malzeme kuru ve MQL (minimum miktarda yağlama) şartları altında frezelenmiştir. MQL yönteminde hem katkısız hem de nano MoS₂ (Molibden disülfür) katkıli bitkisel kesme sıvısı kullanılmış ve kesme kuvveti bileşenleri ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Frezeleme işlemleri, CNC dik işleme merkezinde sabit kesme derinliği (1.5 mm), ilerleme (0.1 mm/dev) ve kesme hızı (250 m/dak) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. MQL yönteminde, kesme sıvısı tek nozülde 26 ml/saat ve 52 ml/saat olmak üzere iki farklı debide kesme bölgesine gönderilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, MQL yönteminde yüksek debide kesme bölgesine gönderilen nano akışkanın kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Minimum Miktarda Yağlama, Alüminyum 6061, Nano MoS₂, Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Kuvvetleri

GİRİŞ

Modern imalat endüstrisi, üretilen parçaların boyutsal doğruluklarının artması, daha iyi yüzey kalitesine sahip olmaları, daha yüksek üretim adetlerini daha düşük takım aşınması ve maliyet ile elde etmek için sürekli olarak kendini geliştirmeye devam etmektedir [1]. Demir esaslı veya demir dışı yüksek mukavemetli parçalar talaşlı imalat yöntemleri ile işlenirken, kesme hızı ile birlikte artan sıcaklık takım dayanımını düşürür ve takımın aşınmasına, zarar görmesine sebep olur [2]. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı düşürmek için, geleneksel sıvı soğutma yöntemleri endüstride sıkça kullanılmaktadır. Ancak, gerek çevresel etkileri gerek maliyetleri bakımından soğutma sıvılarının kullanımının azaltılması kritik önem taşımaktadır [3]. Soğutma sıvılarının maliyetinin toplam maliyetin %8-16'sı arasında olduğu kabul edilmektedir. Bilindiği üzere endüstride kullanılan kesme sıvılarının büyük çoğunluğu mineral esaslı olup, insan sağlığına ve çevreye zararlı ağır elementler içerebilmektedirler [4,5]. Bu sebeple, daha az kesme sıvısının kullanıldığı MQL (minimum miktarda yağlama) yöntemi uygulamalarda kendisine daha fazla yer bulmaktadır. MQL yönteminin diğer soğutma/yağlama sistemlerine karşı avantajları; daha düşük kesme yağı tüketimi, maliyet ve takım

aşınmasını düşürmesi, yüzey kalitesini artırması ve insan sağlığına ve çevreye olan zararları azaltması olarak sıralanabilir. MQL yöntemindeki yağ tüketimi diğer yöntemlere göre çok daha az olduğundan, sıvı soğutma yönteminde büyük bir maliyet olan ömrünü tamamlamış yağların atık maliyetinden de kurtulmuş olmaktadır [6]. Bu avantajlara ek olarak, işleme sonrası elde edilen talaşlar da neredeyse yağsız olduğu için, talaşların geri dönüşümü de daha ekonomik olmaktadır. Tüm bu avantajlarına rağmen, MQL yönteminin performansının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmakta ve MQL yönteminin diğer soğutma yöntemleri ve kuru işleme ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Ginting vd. [7] Batı Avustralya'da orta boy bir işletmede sıvı soğutma yerine MQL uygulamasının teknik, ekonomik ve çevresel açıdan faydalarını araştırmışlardır. MQL kullanımının sera gazı emisyonlarını ve sıvı atıklarını azalttığını ve bu yeni soğutma/yağlama tekniğinin metal kesme operasyonlarında işleme performanslarını artırdığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak sıvı soğutma yerine MQL sisteminin kullanılmasının çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğe yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Bir diğer endüstriyel uygulama örneği

de 2008 yılında Ford Motor Firmasının Kuzey Amerika'daki fabrikasında, alüminyum vites kutuları, tork konvektör kutuları ve valf gövdelerinin işlendiği 200 işleme merkezinde sıvı soğutma yerine MQL sistemine geçilmesidir. Bu parçalar için MQL sistemi, firmada öncelikli kullanılan soğutma sistemi olarak belirlenmiştir. Firmanın Avrupa'da alüminyum silindir kapağı ve dökme demir motor blokları işlediği iki fabrikasında bazı uygulamalarda hala sıvı soğutma yöntemi kullanılsa da MQL yöntemi birinci soğutma yöntemi olarak 2011 yılından beri kullanılmaktadır. Yeni MQL uygulamaları da Brezilya ve Çin'de bulunan fabrikalarında sisteme alınmaya başlanmıştır [8]. Niketh ve Samuel [9] yaptıkları deneysel çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımını kuru, sıvı ve MQL yöntemi ile işlemişler ve yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme kuvvetlerini incelemişler. En iyi sonuçları sıvı soğutmada almışlar fakat MQL yönteminin kuru işlemekten daha iyi sonuçlar vermesi, sıvı soğutmaya yakın değerler elde edilmesi ve enerji kaynaklarının tüketimi açısından tercih edilebileceğini belirtmişlerdir. Sivaiah ve Chakradhar [10] çalışmalarında, AISI 630 paslanmaz çeliği kuru, sıvı soğutma, kriyojenik ve MQL yöntemleri ile farklı kesme derinliklerinde tormalamışlar, takım aşınmalarını ve talaş formlarını incelemişlerdir. Çalışmada, en iyi yüzey kalitesi kriyojenik soğutmada elde edilmiş olup, kriyojenik soğutmadan sonraki en iyi yüzey kalitesi ise MQL yönteminde elde edilmiştir. Yüzey kalitesinde olduğu gibi serbest yüzey aşınmasında da, en az aşınma kriyojenik soğutma ile elde edilmiş, kriyojenik soğutmadan sonra en az aşınma değerleri MQL yönteminde elde edilmiştir. Rahim ve Dorairaju [11] yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 1045 malzemenin MQL yöntemi kullanarak tormalanmasını incelemişlerdir. Farklı nozül püskürtme çapı, farklı hava basıncı ve farklı nozül-kesici uç mesafeleri denenerek en uygun değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Daha büyük çaplı nozül ile yağlayıcı miktarının artmasıyla daha küçük kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları elde etmişlerdir. MQL soğutma/yağlama sisteminin diğer yöntemler ile birlikte hibrit olarak da kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Stachurski vd. [12] yaptıkları çalışmada, soğutulmuş basınçlı hava ve MQL yöntemlerini birleştirerek kullanmışlardır. Dişli üretiminde kullanılan azdırma takımlarının bilenmesi sırasında yüzeyde oluşan mikro sertlik düşüşü bu hibrit yöntemle aşılmıştır. İki yöntemin birlikte kullanılması tek tek kullanılmaları veya sıvı soğutma ile soğutulmuş basınçlı havanın beraber kullanılmasından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bileme sırasında tüketilen yağ miktarının azaltılmasıyla operatörün sağlığına ve çevreye olan olumlu etkilerinin sistemin avantajı olduğu belirtilmiştir. Mia [13] çalışmasında, AISI 4140 malzemesinin MQL yöntemi ile frezelemesinde optimum kesme hızı,

kesme derinliği ve soğutucu debisini belirlemişlerdir. Spesifik kesme enerjisi ve yüzey kalitesi parametrelerine göre MQL sisteminde optimum debinin 150 ml/saat olarak bulunduğunu belirtmişlerdir. Viswanathan vd. [14] çalışmalarında, 300 mm uzunluğundaki magnezyum alaşımından iş parçasını, kuru ve MQL soğutma yöntemi ile işlemişlerdir. MQL yönteminde 6 bar basınç ve 60 ml/saat debi kullanmışlardır. Çalışmada, takım aşınması ve kesme sıcaklıkları incelenmiş ve en uygun değerleri elde etmek için gerekli kesme hızı, ilerleme, paso ve soğutma sistemi belirlenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlarda MQL sisteminin kuru işlemekten daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Patole ve Kulkarni [15] yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 4340 malzemenin sıvı soğutma ve MWCNT (çok duvarlı karbon nano tüp) katkılı MQL yöntemi kullanılarak farklı ilerleme, debi, kesme derinliği ve kesici uç yarıçap değerlerinde tormalanması incelenmiştir. Doğru bir şekilde uygulandığında nano katkılı MQL yönteminin, kesme kuvvetlerinde ve yüzey kalitesinde ciddi iyileştirmeler sağladığı ve sıvı soğutmaya alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Marques vd. [16], süper alaşım Inconel 718 alaşımını bitkisel kesme yağının içerisine grafit ve MoS₂ ekleyerek MQL yöntemiyle tormalamışlar ve grafit ve MoS₂ katkısının yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünü belirlemişlerdir. Paturi vd. [17] deneysel çalışmalarında, Inconel 718 alaşımının tormalamasında MQL ve yağa ağırlıkça %0.5 oranında mikro boyutlarda WS₂ (Tungsten disülfür) ekledikleri MQL yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, MQL yağına WS₂ katkısının yüzey kalitesini %35'e kadar iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Rahim vd. [18] yaptıkları deneysel çalışmada, AISI 1045 malzemesini kuru ve yağ olarak sentetik ester kullandıkları MQL yöntemi ile tormalamışlardır. MQL yönteminin, kuru işlemeye göre kesme kuvvetlerini, kesme sıcaklığını, takım talaş temas mesafesini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Ekinovic vd. [19], St52 çeliğinin tormalamasında kuru ve MQL yönteminde oluşan yağ-hava karışımına su ekledikleri iki yöntemi karşılaştırmışlardır. Yağ debisi 10-50 ml/saat ve su debisi ise 0.3-0.7 ml/saat olarak ayarlanmıştır. Kesme kuvvetlerinin kuru işlemeye oranla %17 oranına kadar düştüğü ifade edilmiştir. Kedare [20], kalıp çeliğinin parmak freze ile frezelenmesi işleminde MQL ve sıvı soğutma yöntemlerini karşılaştırmış ve MQL yöntemi ile yüzey kalitesinin %27'ye kadar iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Joshi vd. [21] yaptıkları çalışmada, Inconel 600 alaşımı kuru, MQL ve nano Al₂O₃ (Alüminyum oksit) katkılı MQL yöntemi ile tormalanmıştır. Nano katkılı MQL yönteminin diğer soğutma yöntemlerine göre daha iyi yüzey kalitesi değerleri verdiği belirtilmiştir. Ramana [22] yaptıkları deneysel çalışmada, titanyum alaşımı kuru,

sıvı soğutma ve MQL yöntemleri ile tormalanmıştır. En iyi yüzey kalitesi aynı işleme parametreleri altında MQL yöntemi ile elde edilmiştir. Sekhar vd. [23], nano MoS₂ katkılı MQL yöntemini AISI 1040 çeliğinin tormalanmasında kullanmışlardır. Nano MoS₂ katkısını kanola, ayçiçeği ve ticari yağlarda kullanarak, MQL ile kuru işlemeyi ve yağların işleme performanslarını karşılaştırmışlardır. Yağdaki nano katkı oranının ağırlıkça %0.5 olduğu durumda en iyi yüzey kalitesini elde etmişler. Ayrıca, nano MoS₂ parçacıklarının 70-80 nm boyutlarında olduğu durumunda en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Kumar vd. [24], AISI 4340 malzemesini kuru, sıvı soğutma ve MQL şartlarında tormalamışlardır. Araştırmacılar, MQL yönteminin kuru ve sıvı soğutma işlemlerine kıyasla yüzey kalitesini arttırdığını ifade etmişlerdir. Sharma vd. [25], AISI 1040 malzemesinin tormalanması işleminde kuru, sıvı soğutma, MQL ve nano SiO₂ (Silisyum oksit) katkılı MQL yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre nano SiO₂ katkılı MQL yönteminin, MQL ve sıvı soğutma yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvvetlerinde daha iyi değerler verdiği belirlenmiştir. Yapılan ölçümlere göre yağ içerisine katılan nano parçacığın miktarı arttıkça hem yağın termal iletkenliğinin hem de viskozitesinin arttığı tespit edilmiştir. Termal iletkenliğin artması takım-iş parçası ara yüzündeki sıcaklığı düşmesinde olumlu etki yaparken, artan viskozite sprey basınç düşüşüne sebep olduğu için negatif bir etki yapmaktadır. Bu sebepten dolayı çalışmada optimum değer olarak ağırlıkça %1 nano katkı oranında karar kılınmıştır. Sharma vd. [26], AISI 1040 malzemesinin tormalanması işleminde kuru, sıvı, MQL ve ayrıca nano TiO₂ (Titanyum oksit) katkılı MQL yöntemlerini kullanmışlar ve nano TiO₂ katkılı MQL yönteminde takım aşınmasının nano katkısız MQL yöntemine göre %35.85 azaldığını belirtmişlerdir. Sharma vd. [27] yaptıkları başka bir çalışmada, Al₂O₃ katkılı MQL yöntemini AISI 1040 malzemesinin tormalanması işleminde denemişler ve nano katkısız MQL yöntemine göre kesme kuvvetlerinin %29.2 azaldığını belirtmişlerdir. Iqbal vd. [28], soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi işleminde MQL ve kuru işleme yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. MQL yöntemi ile takım ömrünün arttığını ve işlem maliyetinin düştüğünü belirtmişlerdir. Kuru işleme ile MQL yönteminin karşılaştırıldığı bir başka çalışmada ise Elmunafi vd. [29] tarafından yapılmıştır. Sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin kuru ve MQL yöntemleri ile tormalanması incelenmiştir. MQL yönteminde takım ömrünün daha uzun olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, Alüminyum 6061 malzemesi kuru ve MQL yöntemi ile frezelenmiştir. MQL yönteminde katkısız ve nano MoS₂ katkılı bitkisel

kesme sıvısı kullanılmıştır. Bu yöntemlerin, kesme kuvveti bileşenleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği sabit tutulurken, MQL debisi olarak 2 farklı değer seçilmiş ve etkisi araştırılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Malzeme ve Kesici Takım

Deneyisel çalışmalarda, havacılık ve denizcilik sektörlerinde birçok parçada, valf ve valf parçalarında, hidrolik pistonlarda kullanılan Alüminyum 6061-T651 malzemesi takma uçlu freze takımı ile işlenmiştir. Deneylerde kullanılan Alüminyum 6061-T651 malzemesinin kimyasal bileşenleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Alüminyum 6061-T651 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

Si	%0.76
Fe	%0.63
Cu	%0.3
Mn	%0.15
Mg	%0.99
Cr	%0.17
Ni	%0.014
Zn	%0.14
Ti	%0.023
Ga	%0.01
V	%0.02
Al	Kalan

Alüminyum 6061 iş parçası 140 mm x 170 mm x 30 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. İş parçasının 140 mm uzunluğundaki kenarından 16 mm genişliğinde ve 1.5 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Frezeleme işlemleri, iki adet kesici uç takılan 16 mm çapındaki takma uçlu freze takımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesici uç olarak APHT 100308FR-27P kaplamasız karbür uçlar kullanılmıştır. Deneylerde kesme sıvısı olarak Eraoil KT/2000 ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalarda kullanılan nanolevhalar şeklindeki MoS₂ parçacıklar, %99.9 saflıkta ve 0.98 g/cm³ yoğunluktadır. Nano MoS₂ parçacıkların boyutları 10-20 nm arasında değişmekte, yüzey alanı yaklaşık 120 m²/g ve ısıl iletkenlik katsayısı yaklaşık 35 W/mK'dir.

Nano MoS₂ Katkılı Kesme Sıvısının Hazırlanması

Nano MoS₂ katkıli kesme sıvısı hazırlanırken, nano MoS₂ parçacıkların nemden arındırılması için iki saat 120°C’de Termal marka G11420SD model etüv kullanılarak kurutulmuşlardır. Hassas terazide tartılan ticari bitkisel kesme yağının ağırlıkça %1’i oranında nano MoS₂ katılmıştır. Daha sonra nano parçacıkların yağ içerisinde homojen olarak dağılması için emülsifer olarak yağ ağırlığının %2’si oranında lesitin tartılarak yağ içerisine katılmıştır. Oluşturulan karışım, Daihan marka WiseTis HG-15D model dijital homojenizatör vasıtasıyla 5000 dev/dak’da 2 saat süresince karıştırılmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Elde edilen karışım MQL sisteminin daha önceden temizlenen yağ haznesine doldurularak nano katkıli MQL deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Frezeleme Deneylerinin Yapılması

Frezeleme deneyleri sırasında, kesme parametreleri olarak 1.5 mm sabit kesme derinliği, 0.1 mm/dev sabit ilerleme ve 250 m/dak sabit kesme hızı seçilmiştir. Deneyler, kuru kesme, katkısız ve nano MoS₂ katkıli bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen frezeleme işlemleri CNC dik işleme merkezinde Şekil 1’de gösterildiği şekilde yapılmıştır. MQL sisteminde yağ ile havayı birbirine karıştırıp, kesme bölgesine göndermek için mikro yağlama sistemi kullanılmıştır. MQL akış debileri, literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak 26 ml/saat ve 52 ml/saat olarak seçilmiş ve tek nozülün kesme bölgesine gönderilmiştir. MQL metodu ile frezeleme işlemlerinde, nozül literatür çalışmaları da göz önünde bulundurularak, kesme bölgesine yaklaşık 30 mm mesafede ve 45° açı ile yerleştirilmiştir.



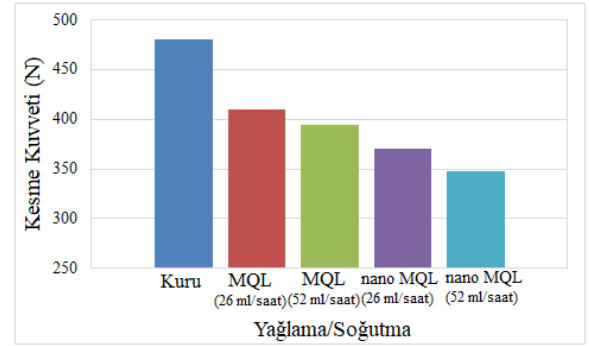
Şekil 1. Frezeleme deneylerinin yapıışı

Kesme ve ilerleme kuvvetleri iş parçası altına yerleştirilen Kistler 92578A dinamometre ile ölçülmüştür. Dinamometre, üç ekseninde de 5 N – 5 kN arasında kuvvet ölçümü yapabilmekte ve 0-70°C sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Kanal üzerinde yapılan 10 adet ölçümün ortalaması alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

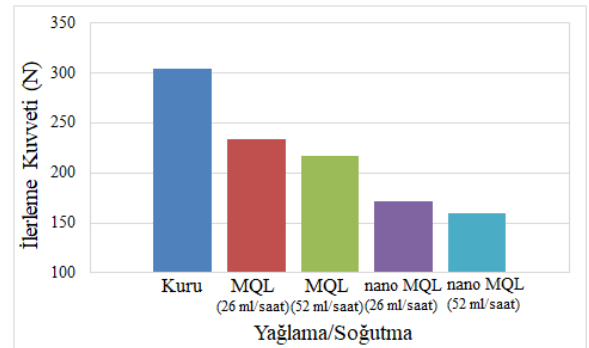
DENEYSEL SONUÇLAR

Kesme ve İlerleme Kuvvetleri

Şekil 2 ve Şekil 3’de kesme ve ilerleme kuvvetlerinin, yağlama/soğutma şartlarına göre değişimi görülmektedir. Deneysel sonuçlara göre en küçük kesme ve ilerleme kuvvetleri, nano MoS₂ katkıli MQL yönteminde, toplam 52 ml/saat debi uygulandığında elde edilirken en yüksek kesme ve ilerleme kuvvetleri kuru kesme işleminde elde edilmiştir.



Şekil 2. Kesme kuvvetinin yağlama/soğutma koşulu ile değişimi



Şekil 3. İlerleme kuvvetinin yağlama/soğutma koşulu ile değişimi

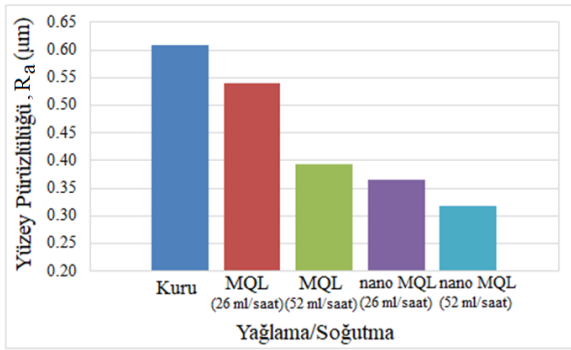
MQL yönteminde, aerosol debisinin kesme ve ilerleme kuvvetleri üzerine etkili olduğu Şekil 2 ve Şekil 3’den görülmektedir. MQL yönteminde, debi 26 ml/saat’den 52 ml/saat’e çıkartıldığında kesme kuvveti %3.9 oranında ve ilerleme kuvveti %7.1

oranında azalmıştır. Aerosol debisindeki artışın kesme kuvvetlerine etkisi, nano katkılı MQL yöntemlerinde de görülmüştür. Nano MoS₂ katkılı debinin 26 ml/saat'den 52 ml/saat'e çıkartıldığında kesme ve ilerleme kuvvetleri sırasıyla %6.2 ve %7.4 oranında azalmıştır.

MQL yönteminde yağa nano katkısı kesme ve ilerleme kuvvetlerini etkilemiştir. MQL yönteminde nano katkı olarak MoS₂ kullanımı, nano parçacıkların takım-iş parçası ve takım-talaş ara yüzeylerine nüfuziyeti ile oluşan tabaka sayesinde, yağlama performansını arttırmış ve kesme ve ilerleme kuvvetlerini düşürmüştür. Debi değerinin 26 ml/saat olduğu nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde, katkısız yöntemle göre kesme kuvveti %9.7 oranında azalırken ilerleme kuvveti %26.5 oranında azalmıştır. Debi değerinin 52 ml/saat olduğu nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde ise katkısız MQL yöntemine göre kesme kuvveti %11.8 oranında ve ilerleme kuvveti %26.7 oranında düşmüştür.

Yüzey Pürüzlülük Sonuçları

Yüzey pürüzlülük değerlerinin yağlama/soğutma şartları ile değişimi Şekil 4'de görülmektedir. MQL yönteminde nano MoS₂ katkısının takım-iş parçası ara yüzüne nüfuziyeti sonucu, nano MoS₂ parçacıkların yuvarlanma ve parlatma etkisi yüzey kalitesinin artmasında rol oynamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerine göre minimum yüzey pürüzlülük değeri uygulanan MQL debisinin 52 ml/saat olduğu nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde elde edilirken maksimum yüzey pürüzlülük değeri ise kuru işlemede ölçülmüştür.



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğünün yağlama/soğutma koşulu ile değişimi

MQL debisinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi bulunmaktadır. MQL yönteminde debinin 26 ml/saat'den 52 ml/saat'e çıkartılmasıyla yüzey pürüzlülüğü %27.1 oranında düşmüştür. Nano MoS₂ katkılı 26 ml/saat debili MQL yönteminde, debinin 52 ml/saat'e çıkartılmasıyla yüzey pürüzlülüğü %12.9 oranında azalmıştır.

MQL yönteminde yağa nano katkısı, nano MoS₂ parçacıkların yağlayıcılık etkisinden dolayı yüzey pürüzlülüğü değerlerini de etkilemiştir. Nano MoS₂ katkılı MQL yönteminde 26 ml/saat ve 52 ml/saat debi değerlerinde yüzey pürüzlülükleri, katkısız kesme sıvısının kullanıldığı duruma göre sırasıyla %32.4 ve %19.2 oranlarında azalmıştır.

SONUÇ

Bu deneysel çalışmada, Alüminyum 6061 malzemesi, kuru işleme ve MQL yöntemi kullanılarak sabit kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme değerlerinde frezelenmiştir. MQL yönteminde, katkısız ve nano MoS₂ katkılı bitkisel kesme sıvıları kullanılmıştır. Yağlama/soğutma şartlarının kesme ve ilerleme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- MQL yöntemi ile frezelemede, kuru işlemeye göre yüzey pürüzlülüğü azalmış, kesme ve ilerleme kuvvetleri düşmüştür.
- MQL yöntemi ile frezelemede debi arttırıldıkça, nano MoS₂ katkılı ve katkısız durumlarda yüzey pürüzlülükleri ve kesme ve ilerleme kuvvetleri azalmıştır.
- MQL yönteminde kesme sıvısına nano MoS₂ katkıları işleme performansını arttırmıştır. Nano MoS₂ parçacıklarının yağlama özelliklerini artırması ve takım-iş parçası sürtünme yüzeyine daha iyi nüfuziyet sağlaması sayesinde yüzey pürüzlülüğünün azalmasına ve kesme ve ilerleme kuvvetlerinin düşmesine neden olmuştur.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANO MOS₂ REINFORCED CUTTING FLUID ON CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OF ALUMINUM 6061 BY USING MQL METHOD

In this study, Aluminum 6061 material was machined under dry and MQL (minimum quantity lubrication) conditions. In the MQL method, both pure and nano MoS₂ (Molybdenum disulfide) reinforced vegetable cutting fluids were used and cutting force components and surface roughness were investigated. Milling operations were performed at the CNC vertical machining center at constant depth of cut (1.5 mm), feed (0.1 mm/rev) and cutting speed (250 m/min). In the MQL method, the cutting fluid was pulverized to the cutting zone through a single nozzle at two different MQL flow rates as 26 ml/h and 52 ml/h. Based on the experimental studies, it was determined that the nanofluid sent to the cutting zone at high MQL flow rate decreased the cutting forces and surface roughness in MQL method.

Keywords: Minimum Quantity Lubrication, Aluminum 6061, Nano MoS₂, Surface Roughness, Cutting Forces

KAYNAKÇA

1. Suresh, R.K., Krishnaiah, G. ve Venkataramaiah, P., An Experimental Investigation with Minimum Quantity Lubrication and its Comparison with Various Vegetable Oil Based Cutting Fluids during Turning, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 8758-8768.
2. Sharma, A.K., Tiwari, A.K. ve Dixit, A.R., Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining Processes using Conventional and Nano Fluid Based Cutting Fluids: A Comprehensive Review, *Journal of Cleaner Production*, 127 (2016), 1-18.
3. Liu, Z., An, Q., Xu, J., Chen, M. ve Han, S., Wear Performance of (nc-ALTiN)/(a-Si₃N₄) Coating and (nc-ALCrN)/(a-Si₃N₄) Coating in High Speed Machining of Titanium Alloys under Dry and Minimum Quantity Lubrication (MQL) Conditions, *Wear*, 305 (2013), 249-259.
4. Maruda, R.W., Krolczyk, G.M., Feldshtein, E., Nieslony, P., Tyliczszak, B. ve Pusavec, F., Tool Wear Characterizations in Finish Turning of AISI1045 Carbon Steel for MQCL Conditions, *Wear*, 372-373 (2017), 54-67.
5. Pereira, O., Martín-Alfonso, J.E., Rodríguez, A., Calleja, A., Fernandez-Valdivielso, A. ve Lopez de Lacallei, L.N., Sustainability Analysis of Lubricant Oils for Minimum Quantity Lubrication Based on Their Tribo-rheological Performance, *Journal of Cleaner Production*, 164 (2017), 1419-1429.
6. Benedicto, E., Carouc, D. ve Rubio, E.M., Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes, *Advances in Material & Processing Technologies Conference, Procedia Engineering*, 184 (2017), 99-116.
7. Ginting, Y.R., Boswell, B., Biswas, W. ve Islam, N., Advancing Environmentally Conscious Machining, *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia CIRP*, 26 (2015), 391-396.
8. Tai, B.L., Stephenson, D.A., Furness, R.J. ve Shih, A.J., Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining, *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014, Procedia CIRP*, 14 (2014), 523-528.
9. Niketh, S. ve Samuel, G.L., Drilling Performance of Micro Textured Tools under Dry, Wet and MQL Condition, *Journal of Manufacturing Processes*, 32 (2018), 254-268.
10. Sivaiah, P. ve Chakradhar, D., Effect of Cryogenic Coolant on Turning Performance Characteristics during Machining of 17-4 PH Stainless Steel: A Comparison with MQL, Wet, Dry Machining, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21 (2018), 86-96.
11. Rahim, E.A. ve Dorairaju, H., Evaluation of Mist Flow Characteristic and Performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) Machining, *Measurement*, 123 (2018), 213-225.
12. Stachurski, W., Sawicki, J., Wojcik, R. ve Nadolny, K., Influence of Application of Hybrid MQL-CCA Method of Applying Coolant during Hob Cutter Sharpening on Cutting Blade Surface Condition, *Journal of Cleaner Production*, 171 (2018), 892-910.
13. Mia, M., Mathematical Modeling and Optimization of MQL Assisted End Milling Characteristics Based on RSM and Taguchi Method, *Measurement*, 121 (2018), 249-260.
14. Viswanathan, R., Ramesh, S. ve Subburam, V., Measurement and Optimization of Performance Characteristics in Turning of Mg Alloy under Dry and MQL Conditions, *Measurement*, 120 (2018), 107-113.
15. Patole, P.B. ve Kulkarni, V.V., Optimization of Process Parameters based on Surface Roughness and Cutting Force in MQL Turning of AISI 4340 using Nano Fluid, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018), 104-112.
16. Marques, A., Guimarães, C., da Silva, R.B., Fonseca, M.P.C., Sales, W.F. ve Machado, A.R., Surface Integrity Analysis of Inconel 718 after Turning with Different Solid Lubricants Dispersed in Neat Oil Delivered by MQL, *Procedia Manufacturing*, 5 (2016), 609-620.
17. Paturi, U.M.R., Maddu, Y.R., Maruri, R.R. ve Narala, S.K.R., Measurement and Analysis of Surface Roughness in WS₂ Solid Lubricant Assisted Minimum Quantity Lubrication (MQL) Turning of Inconel 718, *Procedia CIRP*, 40 (2016), 138-143.
18. Rahim, E.A., Ibrahim, M.R., Rahim, A.A., Aziz, S. ve Mohid, Z., Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique, *Procedia CIRP*, 26 (2015), 351-354.
19. Ekinovic, S., Prcanovic, H. ve Begovic, E., Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces during MQL Turning of Carbon Steel St52-3, *Procedia Engineering*, 132 (2015), 608-614.
20. Kedare, S.B., Borse, D.R. ve Shahane, P.T., Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine, *Procedia Materials Science*, 6 (2014), 150-153.

21. Joshi, K.K., Behera, R.K. ve Anurag, Effect of Minimum Quantity Lubrication with Al₂O₃ Nanofluid on Surface Roughness and its Prediction using Hybrid Fuzzy Controller in Turning Operation of Inconel 600, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018), 20660-20668.
22. Ramana, M.V., Optimization and Influence of Process Parameters on Surface Roughness in Turning of Titanium Alloy under Different Lubricant Conditions, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 8328-8335.
23. Sekhar, K.C., Reddy, V.V.R., Srikiran, S., Daniel, M. ve Kumar, S., Investigating the Effect of Nano Crystalline MoS₂ Particles on the Surface Integrity of Turned Components, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 7527-7532.
24. Kumar, S., Singh, D. ve Kalsi, N.S., Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity Lubrication, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 3627-3635.
25. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R. ve Singh, R.K., Investigation into Performance of SiO₂ Nanoparticle Based Cutting Fluid in Machining Process, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017), 133-141.
26. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Singh, R.K. ve Dixit, A.R., Tribological Investigation of TiO₂ Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL), *Materials Today: Proceedings*, 3 (2016), 2155-2162.
27. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Singh, R.K. ve Dixit, A.R., Characterization and Experimental Investigation of Al₂O₃ Nanoparticle based Cutting Fluid in Turning of AISI 1040 Steel under Minimum Quantity Lubrication (MQL), *Materials Today: Proceedings*, 3 (2016), 1899-1906.
28. Iqbal, A., Al-Ghamdi, K.A. ve Hussain, G., Effects of Tool Life Criterion on Sustainability of Milling, *Journal of Cleaner Production*, 139 (2016), 1105-1117.
29. Elmunafi, M.H.S., Kurniawan, D. ve Noordin, M.Y., Use of Castor Oil as Cutting Fluid in Machining of Hardened Stainless Steel with Minimum Quantity of Lubricant, *Procedia CIRP*, 26 (2015), 408-411.

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 tanıtıldığı 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 Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

“Dergi Yayın Kurulu” dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulu, MATİM Derneği Yönetim Kurulu tarafından bir yıl süre ile seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda MATİM Derneği 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 Turkish Mechanical Design and Production Society, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standard.

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 <http://matim.org.tr/> sitesinde verilmiştir. Yazarlar, makalelerini TÜBİTAK ULAKBİM tarafından yürütülen <http://dergipark.gov.tr/matim> sitesine yüklemelidirler. Bir sorun ile karşılaşılırsa İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Bilgin Kaftanoğlu (bilgin.kaftanoğlu@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirler. Yazarlar, yayımlanma 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 tanımlanmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

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

Başlıklar

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

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,
- Alt Başlıklar.

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

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı 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 "I" (Ie) 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.

1. Örnek dip notu