

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402

HAZİRAN/JUNE 2016 SAYI/NUMBER : 677



tmmob makina mühendisleri odası aylık yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina

makale article

28

PİNYON TAKIMLA İMAL EDİLEN EVOLVENT HELİSEL DİŞLİLERİN DİŞ PROFİLİNİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA OLUŞTURULMASI
COMPUTERIZED TOOTH PROFILE GENERATION OF INVOLUTE HELICAL GEARS MANUFACTURED BY SHAPER CUTTERS
Cüneyt FETVACI

36

KAYNAK CIVATALARININ PROJEKSİYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE ÇAPAKLANMANIN AZALTILMASINA YÖNELİK OPTİMAL PROSES PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİYLE TESPİT EDİLMESİ
DETERMINATION OF OPTIMIZED PROCESS PARAMETERS BY USING TAGUCHI AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION METHODS, INTENDED FOR MINIMIZATION OF BURRING DEFECT WHILE JOINING THE WELDING BOLTS WITH PROJECTION WELDING OPERATION
Aysel BIYIK, Umut İNCE, Fatih ATEŞ, Kaan YETİLMEZSOY

53

OFİS VE DERSLİKLERDE İÇ HAVA KALİTESİ ÖLÇÜMLERİ VE ANALİZLERİ: TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ ÖRNEĞİ
INDOOR AIR QUALITY IN THE CLASSROOM AND OFFICE AND RELATED MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF RESULTS:
TUNCELİ UNIVERSITY EXAMPLE
Anıl SÖZEN, Erdem IŞIK

PİNYON TAKIMLA İMAL EDİLEN EVOLVENT HELİSEL DİŞLİLERİN DİŞ PROFİLİNİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA OLUŞTURULMASI

Cüneyt Fetvacı

Doç. Dr.,
İstanbul Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul
fetvacic@istanbul.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, pinyon takımla imal edilen helisel dişli çarkların bilgisayar simülasyonu ele alınmaktadır. Dişli teorisi esas alınarak evolvent profilli kesici takımların ve imal edilen dişlilerin matematik modelleri verilmiştir. Profil kaydırma ve asimetric profil gibi tashihler de göz önüne alınmıştır. Matematik modellerden hareketle bilgisayar programları geliştirilmiş, evolvent profilli helisel dişlilerin bilgisayar grafikleri elde edilmiştir. 3-Boyutlu katı model ve sonlu eleman modelleri gösterilmiştir. Bu simülasyonla imalattan önce takım dizayn parametrelerinin dişli geometrisi üzerindeki etkileri incelenebilir.

Anahtar Kelimeler: Asimetric evolvent profil, pinyon takım, helisel dişliler, profil kaydırma, CAD/FEM model

COMPUTERIZED TOOTH PROFILE GENERATION OF INVOLUTE HELICAL GEARS MANUFACTURED BY SHAPER CUTTERS

ABSTRACT

This paper studies the computerized tooth profile generation of helical gears cut with pinion-type shaper cutters. Based on the theory of gearing the mathematical models of pinion-type shaper cutters and generated gears with involute teeth are given. The corrections on geometry such as addendum modification (profile shift) and asymmetric tooth profile are also considered. Computer simulation programs are developed to obtain graphs of generating tools and generated teeth surfaces. Also 3-D solid and finite element models of helical gears are obtained. The effect of tool parameters on generated gear can be investigated before manufacturing.

Keywords: Asymmetric involute profile, pinion cutter, helical gears, profile shift, CAD/FEM modeling

Geliş tarihi : 10.07.2015
Kabul tarihi : 14.04.2016

Fetvacı, C. 2016. "Pinyon Takımla İmal Edilen Evolvent Helisel Dişlilerin Diş Profilinin Bilgisayar Ortamında Oluşturulması," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 677, s. 28-35.

1. GİRİŞ

Alın dişli çarklar paralel miller arasında güç iletiminde kullanılır ve dişlerin mil eksenine konumuna göre düz ve helisel olarak gruplandırılır. Helisel dişli çarklar aynı koşullar altında düz dişli çarklara göre daha sessiz çalışırlar ve daha fazla yük taşıyabilirler. Alın dişlilerde yaygın olarak kullanılan diş profili daire evolventidir. Yuvarlanma metodunu esas alan takımlar dişlilerin seri talaşlı imalatında kullanılmaktadır. İmal edilen dişli ile izafi hareketlerine göre takımlar kremayer, azdırma ve pinyon takım olarak gruplandırılmaktadır. Bu takımların en büyük avantajı verilen bir modül için tüm diş sayılarında imalat olanağı sağlamalarıdır. İç dişli çarkların imalatında da kullanılan pinyon takım planyalama prensibine göre talaş kaldırmaktadır [1-3].

Otomotiv, uçak-uzay teknolojisi gibi yüksek performans gerektiren uygulamalar için dişli çark dizaynında sonlu elemanlar metodu gibi sayısal yaklaşımlar yaygın olarak kullanılır. Böylelikle dişdibi mukavemeti, yüzey mukavemeti ve iletim hatası analizleri için hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilir. Güvenilir netice verebilecek bilgisayar destekli analiz için temel şart diş geometrisinin hassas modellenmesidir. Yuvarlanma mekanizmasına göre imal eden ve imal edilen yüzeylerin tam matematik modeli ifade edilmelidir.

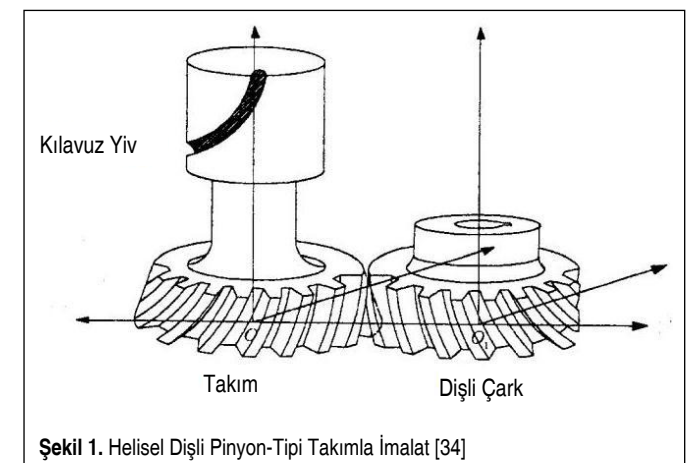
Yuvarlanma metodu ile imal edilen evolvent dişlilerde diş profili evolvent aktif yüzeyden, trokoid kök yüzeyinden ve daire yayı taban yüzeyinden oluşmaktadır. Literatürde çeşitli metotlarla diş profil oluşturmanın matematik modelleri verilmektedir [4-7]. Litvin, kesici takımları ve imal edilen yüzeyleri modellemek için vektör yaklaşım metodu geliştirmiştir [7]. Bu metotta takım yüzeyinin uygun kesit ve koordinat sisteminde vektörel ifadesinden hareket edilerek koordinat dönüşüm, diferansiyel geometri ve eş çalışma denklemi uygulanarak imal edilen dişli yüzeyi elde edilir. Litvin'in vektör yaklaşımından hareketle çok sayıda araştırmacı paralel, kesişen ve aykırı miller arasında güç nakleden çeşitli dişli mekanizmalarının matematik modellenmesi ve analizi ile ilgili çalışmalar sunmuştur [8-22]. Standart takımların yanı sıra, bombeli diş ve asimetric profil gibi modifikasyonlar ile talaşma ve raspalama paylı takımlarla imalat da modellenmektedir [13-16, 23-25]. Asimetric dişlilerde tahrik ve arka yanaklar farklı açılı dizayn edilmiştir. Mekanizma boyut ve ağırlık bakımından optimize edilir ve yük taşıma kapasitesinde artış sağlanır [26].

Kesici takımın uç geometrisi imal edilen dişlinin kök geometrisini ve dolayısıyla dişli çarkın eğilme mukavemetini belirlemektedir. Takım uçları keskin köşeli, köşelerinden yuvarlatılmış ve tam yuvarlak dizayn edilebilmektedir. Alipiev, simetric ve asimetric evolvent profilli dişlileri imal eden kremayer takımların yuvarlatılmış uçlarının geometrik çeşitlilik-

lerini incelemiştir [27]. Bu çalışmaya paralel olarak pinyon takımla imalatta standart diş başı yüksekliğine göre tasarımı mümkün uç geometrileri Fetvacı tarafından sunulmuştur [28]. Yaygın olarak, köşelerinden yuvarlatılmış uçlu takım kullanılmakta, yüksek performans istenen dişlilerde ise kökteki gerilme yığılmasını minimize etmek için tam yuvarlatılmış uçlu takımlar tercih edilmektedir. Yuvarlanma prosesinde takımın yuvarlatılmış ucunun eğrilik merkezinin takip ettiği yörünge, trokoid eğrisi formdadır. Bu eğri birincil trokoid olarak adlandırılır [29]. Bu eğriye uç eğrilik, yarıçapı mesafede paralel eğri ise dişli çarkın kökünü tayin etmektedir ve ikincil trokoid olarak adlandırılmaktadır. Pinyon takımla dış dişli imalatında epitrokoid ve iç dişli imalatında hipotrokoid eğrileri söz konusudur.

Çeşitli yayınlarda pinyon-tipi takımla imalatın matematik modellenmesi ele alınmıştır. Chang ve Tsay [9], evolvent pinyon-tipi takımın taslağı şekillendiren yüzeylerinin matematik modelini vermiş ve eliptik dişli çarkların bu takımla imalatı için gerekli dönüşümleri sunmuştur. Figliolini ve Angeles [11], sivri uçlu pinyon takımla keyfi sayıda loblu eliptik dişlilerin imalatını incelemiştir. Lian [30], helisel pinyon takımla imal edilen iç ve dış dişlilerin kök geometrisinin tayini ile ilgili ifadeleri sunmuştur. Fetvacı [20-21, 28], eliptik dişlilerin evolvent düz pinyon-tipi simetric takımla imalatı için Chang ve Tsay'in sunduğu matematik modeli [9], dönüşümleri sadeleştirerek, asimetric düz dişli profili oluşturmak için adapte etmiştir. Kesici takımın taslağına göre izafi konumlarını görselleştiren çalışmalarda literatürde mevcuttur [17, 19-21, 28, 31, 32].

Pinyon-tipi takımla imalatın üretkenliği yüksektir. Takım, imal ettiği dişliye görünüş olarak benzemekle birlikte dişbaşı yüksekliği artırılmış ve yüzeylere talaş kaldırmacı özellikler verilmiştir. Fellow prensibi olarak bilinen bu metotta, düz ve helisel iç ve dış dişliler imal edilebilmektedir. Düz dişli imalatında düz dişli takım kullanılır. Helisel dişli imalatında ise kesme strokunda helisel dişli takıma genişlik boyunca vida



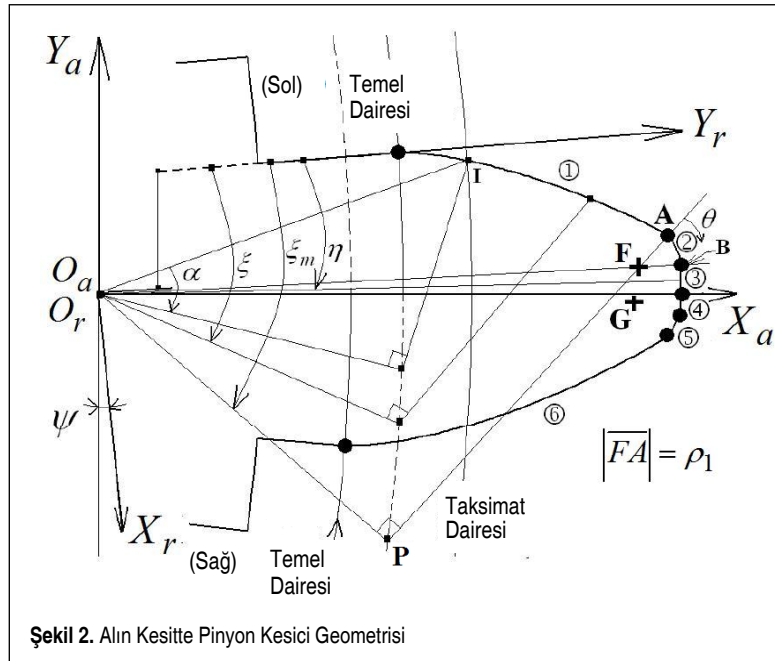
Şekil 1. Helisel Dişli Pinyon-Tipi Takımla İmalat [34]

hareketi (dönme+öteleme) verilerek diş açma sağlanır. Bu hareket için tutturma tertibatındaki kılavuz yiv takım dişi ile aynı helis yönlü, helis açılı ve hatveli olmalıdır. Şekil 1'de, sağ helisli dişli takım ve imal ettiği sol helisli dişli çark görülmektedir [2, 6, 33, 34].

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan pinyon-tipi takımla helisel dişli imalatının bilgisayar simülasyonu ele alınmıştır. Literatürde simetrik evolvent profilli düz dişli çark imali için verilen modelden hareketle, uygun düzenlemelerle asimetrik evolvent helisel dişli modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, kesici takım geometrisi ve matematik modeli verilmiştir. Takım-taslak arasındaki koordinat bağı üçüncü bölümde ele alınmıştır. İmal edilen yüzeylerin matematik modeli verilmiştir. Çalışmada verilen matematik modeller esas alınarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program çeşitli dizayn parametreleri için çalıştırılmıştır. Dördüncü bölümde, program çıkışı dosyaları görselleştirilerek takdim edilmiştir. Böylelikle çeşitli dizayn parametrelerinin imal edilen dişli çark üzerindeki etkileri incelenebilir, gerilme analizi için sonlu eleman modelleri elde edilebilir.

2. PİNYON TAKIMIN MATEMATİK MODELİ

Chang ve Tsay'in [9] düz dişli çark için tesis ettiği matematik model bu çalışmada asimetrik evolvent profilli helisel dişliye uyarlanmıştır. Denklemler helisel pinyon takımın alın kesitinde ifade edilmektedir. Şekil 2'de gösterildiği üzere, pinyon takımında 6 adet imal edici bölge vardır. Alın kesitte gösterilen kesici takımının taslağı şekillendiren bölgeleri evolvent yanak, yuvarlatılmış uç kenarı ve düz tavandan oluşmaktadır.



Şekil 2. Alın Kesitte Pinyon Kesici Geometrisi

Chang ve Tsay'in çalışmasına paralel olarak matematik model tesis edilirken orijinleri takımın ağırlık merkezinde konumlu $S_r (X_r, Y_r)$ referans koordinat sistemi ve $S_a (X_a, Y_a)$ takım alın kesit koordinat sistemi tanımlanmıştır. Referans koordinat sisteminde tesis edilen 1, 2 ve 3. bölgelerin denklemleri aşağıda verilmektedir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere, takımın 1. bölgesi imal edilen helisel dişlinin evolvent yanağını oluşturmaktadır. Eğrisel parametre ξ evolvent bölgedeki bir noktanın konumunu tayin etmekte ve $0 \leq \xi \leq \xi_m$ aralığında değişmektedir. Takımın 1. bölgesinin yer vektörleri S_r koordinat sisteminde aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{R}_r^1 = \begin{Bmatrix} x_r^1 \\ y_r^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_b \sin \xi - r_b \xi \cos \xi \\ r_b \cos \xi + r_b \xi \sin \xi \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Burada r_b helisel dişli pinyon takımın temel dairesi yarıçapıdır.

Takımın 2. bölgesi imal edilen helis dişlinin diş kökünü şekillendirmektedir. Şekil 2'de görüldüğü üzere, θ eğrisel parametresi yuvarlatılmış uçtaki bir noktanın koordinatını tayin etmekte ve $0 \leq \theta \leq \pi/2 - \tan^{-1}(\xi_m - (\rho/r_b))$ aralığında değişmektedir. Yuvarlatılmış ucun eğrilik merkezi maksimum evolvent noktası A'dan temel dairesine indirilen teğet doğrusu \overline{PA} üzerindeki F noktasında konumlandırılır. Takımın 2. bölgesinin yer vektörü koordinat sisteminde aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{R}_r^2 = \begin{Bmatrix} r_b \sin \xi_m - r_b \xi_m \cos \xi_m + \rho \cos \xi_m - \rho \cos(\theta + \xi_m) \\ r_b \cos \xi_m + r_b \xi_m \sin \xi_m - \rho \sin \xi_m + \rho \sin(\theta + \xi_m) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Bu denklemde ρ , takımın yuvarlatılmış ucunun eğrilik yarıçapı ve ξ_m maksimum evolvent açısıdır.

Kesici takımın 3. bölgesi imal edilen dişlinin tabanını şekillendirmektedir. Eğrisel parametre η takımın tabanındaki bir noktanın konumunu tayin etmekte ve $\xi_m + \delta - \pi/2 \leq \eta \leq \tan \alpha_s - \alpha_s + \pi/2N_c$ aralığında değişmektedir. S_r koordinat sisteminde 3. bölgenin denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{R}_r^3 = \begin{Bmatrix} x_r^3 \\ y_r^3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_B \sin \eta \\ r_B \cos \eta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Bu denklemde $r_B = \sqrt{r_b^2 + (r_b \xi_m - \rho)^2} + \rho$ takımın baş dairesi yarıçapıdır ve $(\delta = \pi/2 - \tan^{-1}(\xi_m - (\rho/r_b)))$ 'dir.

Koordinat dönüşümü uygulanarak kartezyen koordinatlarda takım geometrisi elde edilmektedir. Evolvent geometrisinden hareketle koordinat dönüşümü aşağıdaki matris ifade ile sağlanmaktadır.

$$\mathbf{R}_a^i = \begin{Bmatrix} x_a^i \\ y_a^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_r^i \\ y_r^i \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Bu denklemde ψ döndürme açısı evolvent geometrisinden bulunur ve α_s yuvarlanma noktasındaki alın kavrama açısı, N_c takım diş sayısı olmak üzere, $\psi = \pi/2N_c + \tan \alpha_s - \alpha_s$ olarak hesaplanır. Alın kavrama açısı α_s , normal kesitteki kavrama açısı α_n ve helis açısı β verildiğinde $\tan \alpha_s = \tan \alpha_n / \cos \beta$ ifadesinden hesaplanır. Üst indis i sırasıyla 1, 2 ve 3. bölgeleri ifade eder.

Takımın sağ tarafında karşı gelen bölgelerin y_a^i koordinatları uygun işaretlemelerle yazılabilir. Sol ve sağ profil farklı α_n kavrama açısı ile dizayn edilebileceğinden, bağlı tüm büyüklükler ve takım ucu yuvarlatma yarıçapları sırasıyla L ve R alt indisleriyle gösterilebilir. Elde edilen bölge denklemleri aşağıda verilmektedir.

Takımın 1 ve 6. bölgelerinin yer vektörleri S_a koordinat sisteminde aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{R}_a^1 = \begin{Bmatrix} x_a^1 \\ y_a^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{bL} \cos(\xi_L - \psi_L) + r_{bL} \xi_L \sin(\xi_L - \psi_L) \\ -r_{bL} \sin(\xi_L - \psi_L) + r_{bL} \xi_L \cos(\xi_L - \psi_L) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_a^6 = \begin{Bmatrix} x_a^6 \\ y_a^6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{bR} \cos(\xi_R - \psi_R) + r_{bR} \xi_R \sin(\xi_R - \psi_R) \\ r_{bR} \sin(\xi_R - \psi_R) - r_{bR} \xi_R \cos(\xi_R - \psi_R) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Takımın 2 ve 5. bölgelerinin yer vektörleri S_a koordinat sisteminde aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{R}_a^2 = \begin{Bmatrix} r_{iL} \cos(\xi_{iL} - \psi_{iL}) + r_{iL} \xi_{iL} \sin(\xi_{iL} - \psi_{iL}) - \rho_L \sin(\xi_{iL} - \psi_{iL}) + \rho_L \sin(\theta_L + \xi_{iL} - \psi_{iL}) \\ -r_{iL} \sin(\xi_{iL} - \psi_{iL}) + r_{iL} \xi_{iL} \cos(\xi_{iL} - \psi_{iL}) - \rho_L \cos(\xi_{iL} - \psi_{iL}) + \rho_L \cos(\theta_L + \xi_{iL} - \psi_{iL}) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_a^5 = \begin{Bmatrix} r_{iR} \cos(\xi_{iR} - \psi_{iR}) + r_{iR} \xi_{iR} \sin(\xi_{iR} - \psi_{iR}) - \rho_R \sin(\xi_{iR} - \psi_{iR}) + \rho_R \sin(\theta_R + \xi_{iR} - \psi_{iR}) \\ r_{iR} \sin(\xi_{iR} - \psi_{iR}) - r_{iR} \xi_{iR} \cos(\xi_{iR} - \psi_{iR}) + \rho_R \cos(\xi_{iR} - \psi_{iR}) - \rho_R \cos(\theta_R + \xi_{iR} - \psi_{iR}) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

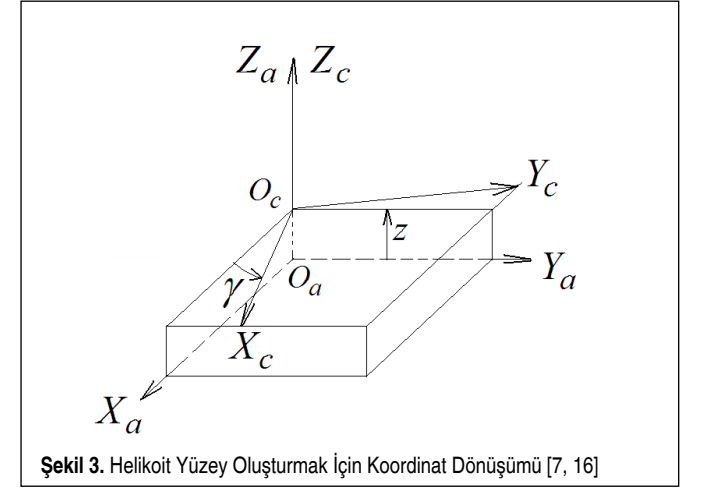
Takımın 3 ve 4. bölgelerinin yer vektörleri S_a koordinat sisteminde aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{R}_a^3 = \begin{Bmatrix} x_a^3 \\ y_a^3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_B \cos(\eta_L - \psi_L) \\ r_B \sin(\eta_L - \psi_L) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_a^4 = \begin{Bmatrix} x_a^4 \\ y_a^4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_B \cos(\eta_R - \psi_R) \\ -r_B \sin(\eta_R - \psi_R) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Şekil 3'te gösterildiği üzere, alın kesitte vida hareketi uygulanarak helisel dişli takımın diş yüzeyi S_c koordinat sisteminde (11) numaralı ifade ile elde edilebilir. Burada döndürme açısı $\gamma = z \tan \beta / r_c$ olarak hesaplanır ve r_c takımın taksimat dairesi yarıçapını gösterir.

$$\mathbf{R}_c^i = \begin{Bmatrix} x_c^i \\ y_c^i \\ z_c^i \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_a^i \\ y_a^i \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (11)$$



Şekil 3. Helikoit Yüzey Oluşturmak İçin Koordinat Dönüşümü [7, 16]

Diferansiyel geometriden, koordinat sisteminde ifade edilen takım yüzeylerinin normal vektörleri (12) numaralı denklemle, birim normal vektörleri ise (13) numaralı denklemle hesaplanır [7].

$$N_c^i = \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial l_j} \times \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial z} \quad (12)$$

$$\mathbf{n}_c^i = \frac{\frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial l_j} \times \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial z}}{\left| \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial l_j} \times \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial z} \right|} \quad (13)$$

Burada l_j parametresi sırasıyla, takımın eğrisel parametreleri ξ , θ ve η 'yi gösterir.

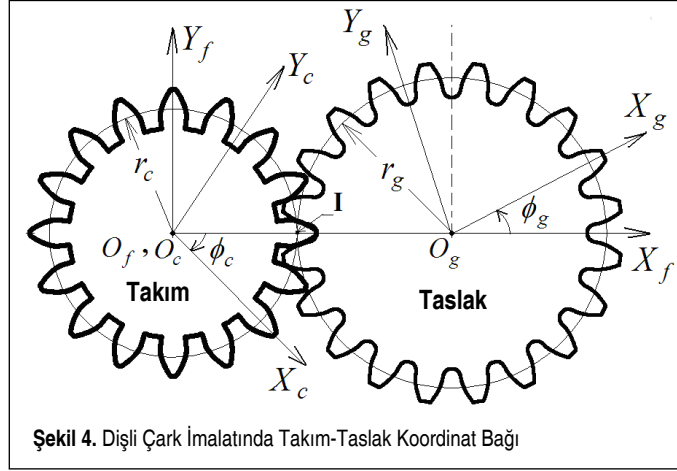
Takımın evolvent formda 1 ve 6. bölgelerinin normal vektörleri (5), (6) ve (13) numaralı ifadelerden hesaplanabilir. (14) numaralı denklemde üst işaret, birinci (sol) ve alt işaret, altıncı (sağ) bölgeleri ifade eder.

$$N_c^i = \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial l_j} \times \frac{\partial \mathbf{R}_c^i}{\partial z} = r_{bL,R} \xi_{L,R} \begin{Bmatrix} \mp \sin(\xi_{L,R} - \psi_{L,R} \mp \gamma) \\ -\cos(\xi_{L,R} - \psi_{L,R} \mp \gamma) \\ \cos \alpha_{sL,R} \tan \beta \end{Bmatrix} \quad (i = 1 \text{ ve } 6) \quad (14)$$

3. İMAL EDİLEN DİŞLİNİN MATEMATİK MODELİ

Pinyon takım ile imal edilen dişli çark arasındaki koordinat bağı Şekil 4'te gösterilmiştir. $S_c (X_c, Y_c)$ pinyon takımın koordinat sistemi, $S_g (X_g, Y_g)$ imal edilen çark dişlisinin koordinat sistemi ve $S_f (X_f, Y_f)$ sabit olan referans koordinat sistemidir. Yuvarlanma sürecinde pinyon takım ϕ_c açısı kadar dönerken imal edilen çark ise ϕ_g açısı kadar dönmektedir.

S_c takım koordinat sisteminde S_g taslak koordinat sistemine



Şekil 4. Dişli Çark İmalatında Takım-Taslak Koordinat Bağı

dönüşümü sağlayan koordinat dönüşüm matrisi (15) numaralı ifadede verilmiştir [7].

$$[M_{gc}] = \begin{bmatrix} \cos(\phi_c + \phi_g) & \sin(\phi_c + \phi_g) & -(r_c + r_g + e) \cos \phi_g \\ -\sin(\phi_c + \phi_g) & \cos(\phi_c + \phi_g) & (r_c + r_g + e) \sin \phi_g \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

ϕ_g ve ϕ_c dönme açıları arasındaki ilişki N_c takım diş sayısı ve N_g imal edilen diş sayısı olmak üzere $\phi_g = (N_c / N_g) \phi_c$ 'dir. I noktası ani dönme merkezi; r_c takım taksimat yarıçapı ve çark taksimat yarıçapıdır. Normal modül m_n ve profil kaydırma faktörü x_n değerlerinden profil kaydırma miktarı $e = m_n \cdot x_n$ olarak hesaplanır.

Pinyon takım yüzeylerinin geometrik yeri imal edilen dişli çarkın koordinat sisteminde ifade edilir [7].

$$\mathbf{R}_g^i = [M_{gc}] \mathbf{R}_c^i, \quad (i = 1, \dots, 6) \quad (16)$$

Dişli Ana Kanunu gereğince eşlenik diş profillerinin temas noktasındaki müşterek normali izafi ani dönme merkezinden (yuvarlanma dairelerinin değme noktası) geçmelidir. Bu ka-

nunun matematiksel ifadesi eş çalışma denklemi S_c koordinat sisteminde (17) numaralı denklemde verilmiştir [7].

$$\frac{X_c - x_c^i}{n_{cx}^i} = \frac{Y_c - y_c^i}{n_{cy}^i} \quad (17)$$

Burada $X_c = r_c \cos \phi_c$ ve $Y_c = r_c \sin \phi_c$, koordinat sisteminde I noktasının koordinatları; x_c^i ve y_c^i kesici takım yüzeyinin koordinatları; n_{cx}^i ve n_{cy}^i birim normal vektörlerin kartezyen bileşenleridir.

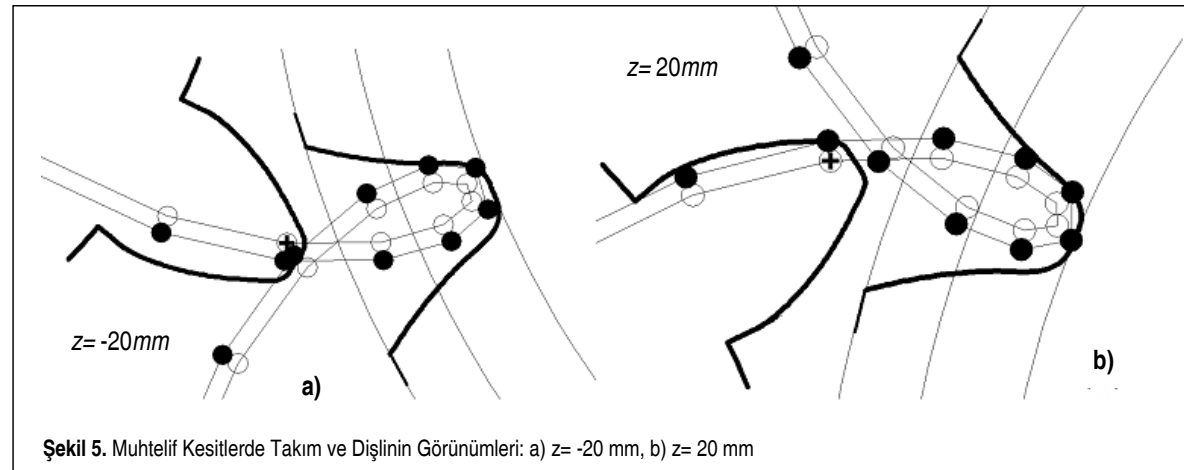
İmal edilen dişli çarkın matematik modeli ise pinyon kesici takımın geometrik yeri ile eş çalışma denkleminin bir kombinasyonudur. (16) ve (17) numaralı denklemler eşzamanlı çözümlenerek imal edilen dişli çark yüzeylerinin matematik modeli elde edilir.

4. BİLGİSAYAR UYGULAMALARI

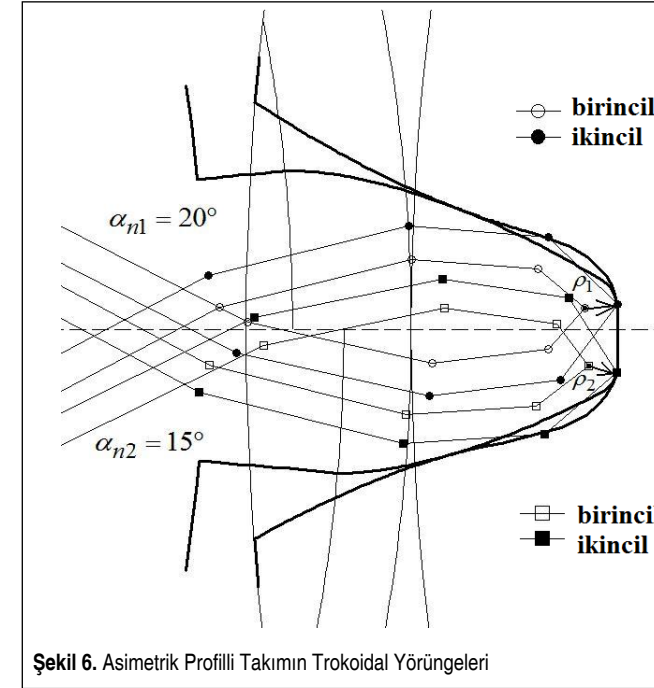
Önceki bölümlerde verilen denklemler uygun bir programlama dili ile bilgisayar ortamına aktarılabilir. Bir grafik işleme programı ile sonuçlar görselleştirilebilir. Bu çalışmada, GW-BASIC derleyicide bir hesaplayıcı program yazılmıştır. Hesaplayıcı programa normal modül, diş sayısı, sağ ve sol profillerin normal kavrama açıları, helis açısı, uç yuvarlatma yarıçapı gibi tasarım parametreleri girilmiştir. Kesici takım, imal edilen dişli, takım ucunun geometrik yeri ve takım izafi konum koordinatlarını listeleyen çıkış dosyaları elde edilmiştir. Bu dosyalar GRAPHER grafik işleme programında ve ANSYS Önışlemci modülünde değerlendirilmiştir. Programın akış diagramı Ek'te verilmiştir.

Şekil 5'te, diş genişliği boyunca muhtelif kesitlerde takım ve imal edilen dişli gösterilmektedir.

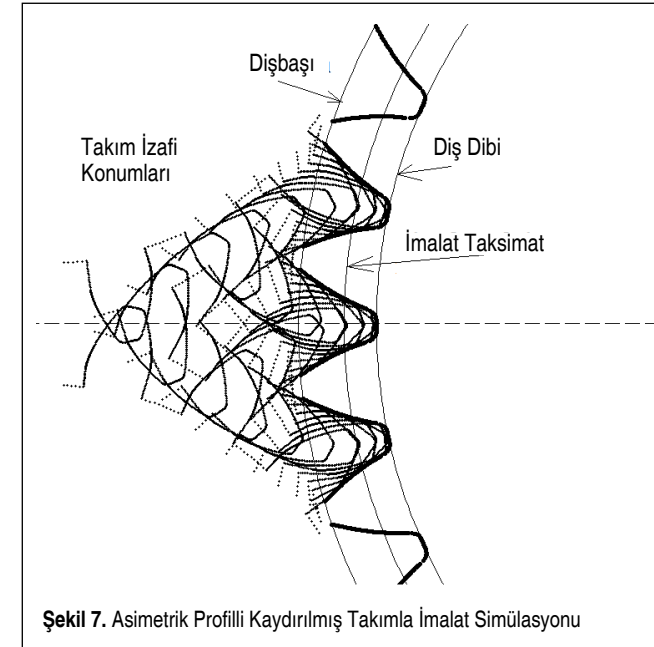
Şekil 6'da, asimetrik profilli takım, imal edilen diş geometrisi, birincil trokid eğrileri ve ikincil trokid eğrileri göster-



Şekil 5. Muhtelif Kesitlerde Takım ve Dişlinin Görünümleri: a) z = -20 mm, b) z = 20 mm



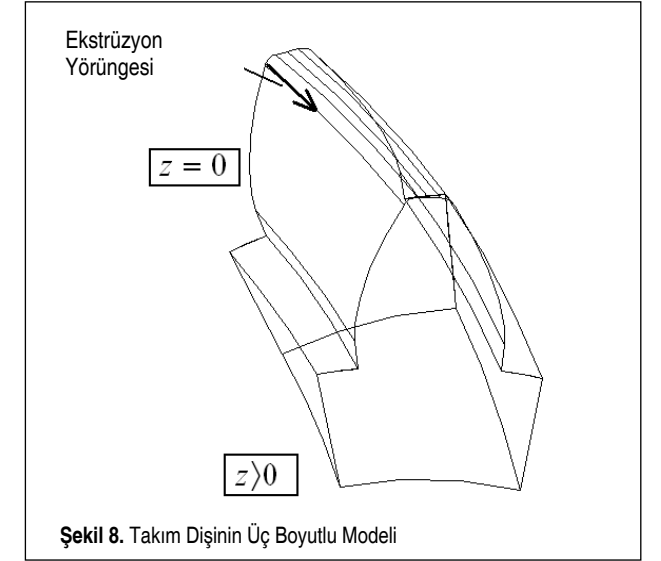
Şekil 6. Asimetrik Profilli Takımın Trokoidal Yörüngeleri



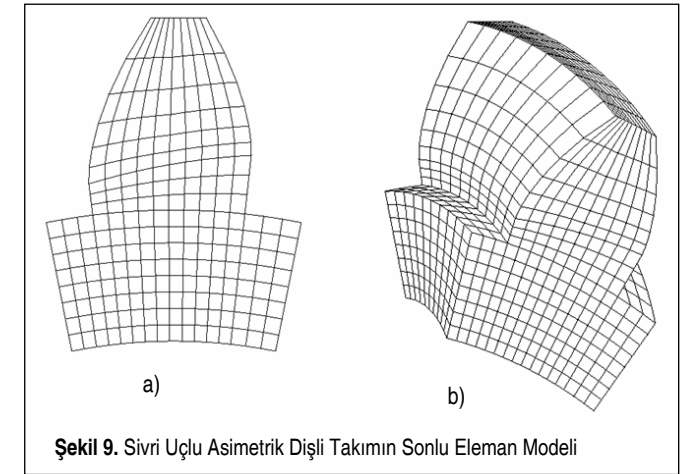
Şekil 7. Asimetrik Profilli Kaydırılmış Takımla İmalat Simülasyonu

ılmaktadır. Bu örnekte normal modül $m_n = 3 \text{ mm}$, takım diş sayısı $N_c = 20$, çark diş sayısı $N_g = 30$, sol profil kavrama açısı $\alpha_{n1} = 20^\circ$, sağ profil kavrama açısı $\alpha_{n2} = 15^\circ$ ve helis açısı $\beta = 20^\circ$ alınmıştır. Uç yuvarlatma yarıçapları $\rho_1 \times (1 - \sin \alpha_{n1}) = \rho_2 \times (1 - \sin \alpha_{n2})$ bağıntısına göre hesaplanır ve $\rho_1 = 0.2 \times m_n$ 'dir.

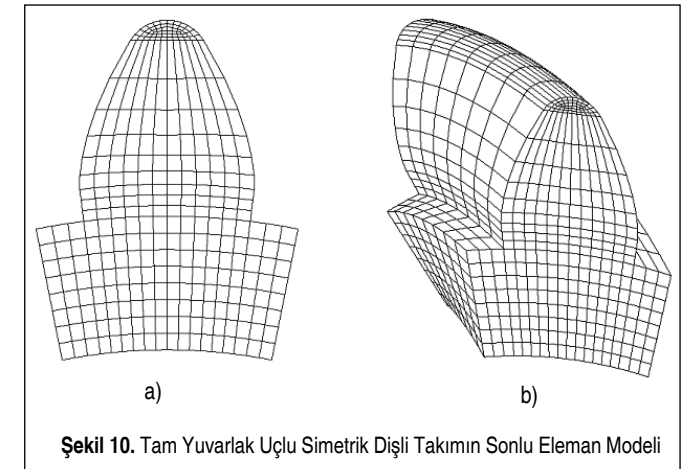
Şekil 7'de, yuvarlanma prosesinde kesici takımın taslağa göre izafi konumları ve imal edilen çark diş profili gösterilmektedir. Dizayn parametreleri önceki örnekle aynıdır ve pozitif profil kaydırma miktarı uygulanmıştır.



Şekil 8. Takım Dişinin Üç Boyutlu Modeli



Şekil 9. Sivri Uçlu Asimetrik Dişli Takımın Sonlu Eleman Modeli



Şekil 10. Tam Yuvarlak Uçlu Simetrik Dişli Takımın Sonlu Eleman Modeli

Tasarım ve analiz için üç boyutlu katı model elde edilebilir. Alın kesitte elde edilen iki boyutlu diş profili aksene doğru helikoit formda eğri boyunca ötelenerek üç boyutlu diş modeli oluşturulur [35-36]. Şekil 8'de kesici takım dişinin üç boyutlu modeli gösterilmektedir.

Dişli çarkın üç boyutlu sonlu eleman modeli alın kesitte oluşturulan modelden elde edilebilir. Şekil 9'da gösterildiği üzere, sivri uçlu asimetric dişli takımın alın kesiti iki boyutlu elemanlarla modellendikten sonra helikoit yörünge boyunca ötelenerek üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Şekil 10'da ise tam yuvarlak uçlu simetric takımın sonlu eleman modelleri gösterilmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, literatürde mevcut evolvent profilli düz dişli pinyon takım matematik modelinden hareketle, uygun dönüşüm ve düzenlemelerle evolvent helisel dişli imalat simülasyonu için model geliştirilmiştir. Asimetric dizayn ve profil kaydırma da göz önüne alınmıştır. Takım uç eğrilik merkezinin trokoid yörüngesi incelenmiştir. Uygun programlama yaklaşımı ile çeşitli dizayn parametreleri için imal eden ve imal edilen dişli yüzeylerinin grafikleri elde edilmiştir. Böylelikle imalattan önce dizayn parametrelerinin dişli üzerindeki etkileri incelenebilir. Ayrıca ileri nümerik analiz için 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman modelleri gösterilmiştir. Kesici takımın taslağa göre izafi konumları da görselleştirilmiştir. Bu görselleştirme talaş geometrisinin tayininde ve buna bağlı olarak takımın ömür analizinde kullanılabilir. Sunulan matematik model, eliptik dişli çarklara ve beveloid (evolvent konik) dişli çarklara genişletilebilir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No. BYP- 38122) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

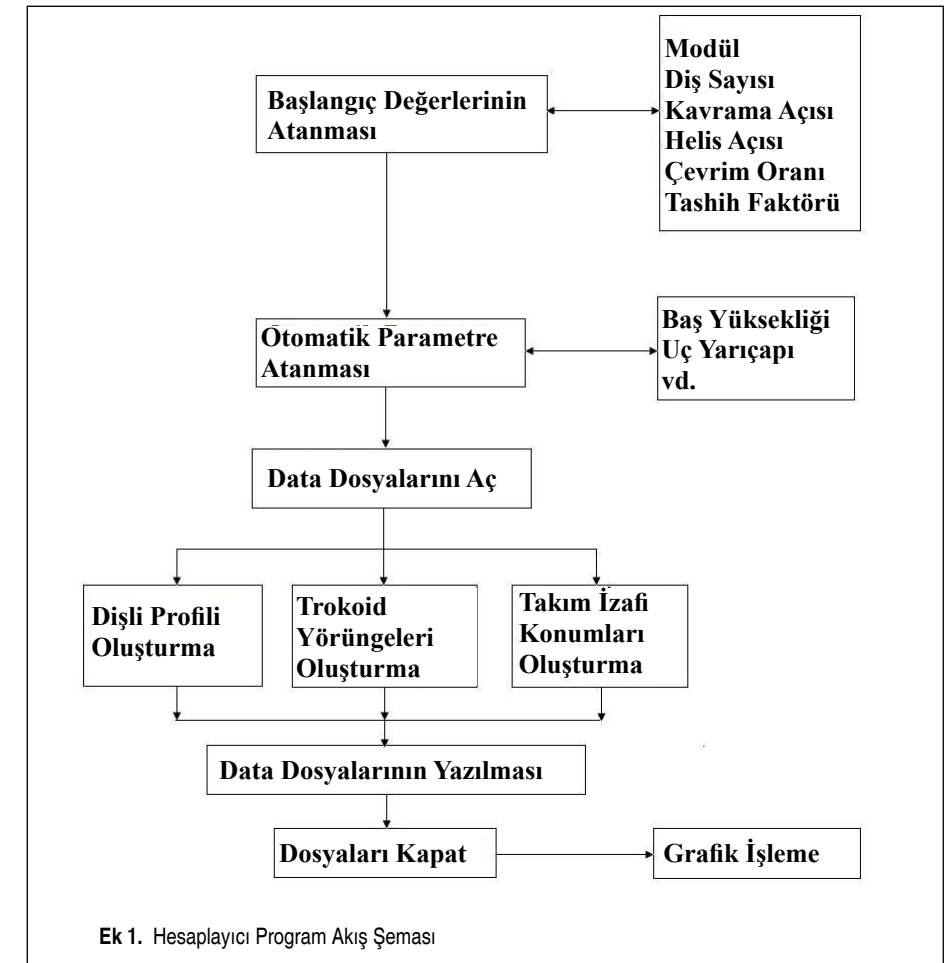
1. Akkurt, M. 1999. Makina Elemanları: Dişli Çarklar ve Diğer Güç İletim Elemanları, Birsan Yayınevi, İstanbul.
2. Çakmak, S. 1980. Dişli Çarklar: Geometri-Mukavemet-Teknoloji, İstanbul.
3. Jelaska, D. 2012. Gears and Gear Drives, Wiley, West Sussex, UK.
4. Buckingham, E. 1988. Analytical Mechanics of Gears, McGraw-Hill, New York, USA.
5. Salamoun, C., Suchy, M. 1973. "Computation of Helical or Spur Gear Fillets," Mechanism and Machine Theory, vol. 8 (3), p. 305-323.
6. Colbourne, J. R. 1987. The Geometry of Involute Gears, Springer-Verlag, New Jersey, USA.
7. Litvin, F. L. 1994. Gear Geometry and Applied Theory, Prentice Hall, New Jersey, USA.
8. Tsay, C. B. 1988. "Helical Gears with Involute Shaped Teeth: Geometry, Computer Simulation, Tooth Contact Analysis and

9. Chang, S. L., Tsay, C. B. 1998. "Computerized Tooth Profile Generation and Undercut Analysis of Noncircular Gears Manufactured with Shaper Cutters," Journal of Mechanical Design, vol. 120 (1), p. 92-99.
10. Liu, C. C., Tsay, C. B. 2001. "Tooth Undercutting of Beveloid Gears," Journal of Mechanical Design, vol. 123 (4), p. 569-576.
11. Figliolini, G., Angeles, J. 2003. "The Synthesis of Elliptical Gears Generated by Shaper-Cutters," Journal of Mechanical Design, vol. 125 (4), p. 793-801.
12. Brauer, J. 2004. "A General Finite Element Model of Involute Gears," Finite Elements in Analysis and Design, vol. 40 (13-14), p. 1857-1872.
13. Chen, C. F., Tsay, C. B. 2005. "Tooth Profile Design for the Manufacture of Helical Gear Sets with Small Numbers of Teeth," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45 (12-13), p. 1531-1541.
14. Yang, S. C. 2005. "Mathematical Model of a Helical Gear with Asymmetric Involute Teeth and Its Analysis," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 26 (5-6), p. 448-456.
15. Yang, S. C. "Study on an Internal Gear with Asymmetric Involute Teeth," Mechanism and Machine Theory, vol. 42 (8), p. 977-994.
16. Tsay, M. F., Fong, Z. H. 2007. "Novel Profile Modification Methodology for Moulded Face-gear Drives," Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 221 (6), p. 715-725.
17. Fetvacı, C., İmrak, E. 2008. "Mathematical Model of a Spur Gear with Asymmetric Involute Teeth and Its Cutting Simulation," Mechanics Based Design of Structures and Machines, vol. 36 (1), p. 34-46.
18. Wu, S. Z., Tsai, S. J. 2009. "Contact Stress Analysis of Skew Conical Involute Gear Drives in Approximate Line Contact," Mechanism and Machine Theory, vol. 44 (9), p. 1658-1676.
19. Fetvacı, C. 2010. "Computer Simulation of Helical Gears with Asymmetric Involute Teeth", Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 25 (3), p. 441-447.
20. Fetvacı, C. 2010. "Definition of Involute Spur Gear Profiles Generated by Gear-Type Shaper Cutters," Mechanics Based Design of Structures and Machines, vol. 38 (4), p. 481-492.
21. Fetvacı, C. 2010. "Generation Simulation of Involute Spur Gears Machined by Pinion-Type Shaper Cutters," Strojniski vestnik-Journal of Mechanical Engineering, vol. 56 (10), p. 644-652.
22. Chen, W. L., Tsay, C. B. 2011. "Mathematical Model and Tooth Surfaces of Recess Action Wormgears with Double-depth Teeth," Mechanism and Machine Theory, vol. 46 (12), p. 1840-1853.
23. Chen, Y. C., Tsay, C. B. 2002. "Stress Analysis of a Helical

Gear Set with Localized Bearing Contact," Finite Elements in Analysis and Design, vol. 38 (8), p. 707-723.

24. Kuang, J. H., Chen, W. L. 1996. "Determination of Tip Parameters for the Protuberance Preshaving Cutters," Mechanism and Machine Theory, vol. 31 (7), p. 839-849.
25. Tsay, C. B., Liu, W. Y., Chen, Y. C. 2000. "Spur Gear Generation by Shaper Cutters," Journal of Materials Processing Technology, vol. 104 (3) p. 271-279.
26. Kapelevich, A. L., McNamara, T. M. 2005. "Direct Gear Design for Automotive Applications," SAE 2005 World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA.
27. Alipiev, O. 2011. "Geometric Design of Involute Spur Gear Drives with Symmetric and Asymmetric Teeth using the Realized Potential Method," Mechanism and Machine Theory, vol. 46 (1), p. 10-32.
28. Fetvacı, C. 2011. "Yuvarlanma Metodu ile İmal Edilen Asimetric Evolvent Düz Dişlilerin Bilgisayar Simülasyonu," Mühendis ve Makina, cilt 52, no. 516, s. 60-69.
29. Su, X., Houser, D. R. 2000. "Characteristics of Trochoids and their Application to Determining Gear Teeth Fillet Shapes," Mechanism and Machine Theory, vol. 35 (2), p. 291-304.

30. Lian, G. 2006. "Determining the Shaper Cut Helical Gear Fillet Profile," Gear Technology, vol. 23, p. 56-67.
31. Tang, X., Ren, F., Jiang, Y., Gao, S. 2008. "Geometric Modeling and Dynamic Simulation of Involute Gear by Generating Method," 13th International Conference on Geometry and Graphics, August 4-8, Dresden.
32. Alipiev, O., Antonov, S., Grozeva, T. 2013. "Generalized Model of Undercutting of Involute Spur Gears Generated by Rack-cutters," Mechanism and Machine Theory, vol. 64, p. 39-52.
33. Ulukan, L., Özsoy, T. 1973. Dişli Çark Mekanizmaları, İTÜ Makina Fakültesi Makina Elemanları Kürsüsü, İstanbul.
34. Chen, C. K., Lai, H. Y., Wu, C. T., Li, T. J. 2001. "A High-Precision Tool Model for Helical Pinion Cutters," Imeche Journal of Engineering Manufacture, vol. 215 (2), p. 161-168.
35. Hedlund, J., Lehtovaara, A. 2008. "A Parameterized Numerical Method for Generating Discrete Helical Gear Tooth Surface Allowing Non-standard Geometry," Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 222 (6), p. 1033-1038.
36. Fetvacı, C. 2011. "Computer Simulation of Helical Gears Generated by Rack-Type Cutters," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 36 (7), p. 1321-1332.



Ek 1. Hesaplayıcı Program Akış Şeması

KAYNAK CIVATALARININ PROJEKSİYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE ÇAPAKLANMANIN AZALTILMASINA YÖNELİK OPTİMAL PROSES PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİYLE TESPİT EDİLMESİ

Aysel Biyik*

Norm Civata San. Tic. A.Ş. AR-GE Merkezi,
İzmir
aysel.biyik@norm-fasteners.com.tr

Umut İnce

Norm Civata San. Tic. A.Ş. AR-GE Merkezi,
İzmir
umut.ince@norm-fasteners.com.tr

Fatih Ateş

Ermatal Otomotiv ve Eşya San. Tic. A.Ş.
AR-GE Merkezi, Bursa
fatih.ates@ermatal.com

Kaan Yetilmezsoy

Doç. Dr.,
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul
yetilmez@yildiz.edu.tr

ÖZ

Projeksiyon kaynağı sırasında civata dişlerine ve civatanın kaynatıldığı saca eriyik metal fişkirarak bu parçalar üzerinde çapak oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum, fonksiyon kaybı ve korozyon başlatma riski nedeniyle, başta otomotiv sektörü olmak üzere, kullanılan her alanda güvenlik problemi doğurmaktadır. Ayrıca bu durum müşteri şikayetine neden olarak rekabette prestij ve güç kaybına yol açmaktadır. Bu çalışmada, kaynak dayanımından ödün verilmeden çapaklanma problemi en aza indirmeye çalışılmıştır. Kaynak civatasının kabartı boyutları ve proses parametrelerinin etki dereceleri ile optimum değerleri Taguchi ve çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinden olan kompozit çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile belirlenmiştir. Fişkirma ve çapaklanma endeksi ve kaynak kopma kuvveti olmak üzere her iki yanıt faktörünü de kapsayan kompozit çekicilik fonksiyonu yaklaşımıyla tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Kaynak prosesi açısından akım, kuvvet ve kabartı yüksekliği gibi parametrelerin optimal değerleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Projeksiyon kaynağı, kaynak civatası, çapaklanma, Taguchi, çok amaçlı optimizasyon

DETERMINATION OF OPTIMIZED PROCESS PARAMETERS BY USING TAGUCHI AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION METHODS, INTENDED FOR MINIMIZATION OF BURRING DEFECT WHILE JOINING THE WELDING BOLTS WITH PROJECTION WELDING OPERATION

ABSTRACT

Expulsion of the molten material onto the bolt thread and bolt welded sheet during projection welding, causes burr formation on these parts. Used in all sectors and notably in the automotive industry, this situation arises major security problems causing functional loss and the corrosion risk. Moreover, these defects cause the loss of prestige and the power on competition by engendering customer complaints. In this study, burring problem is minimized without making any concessions about weld strength. Projection dimensions of weld bolt, effect level and the optimized values of welding process parameters are defined by using Taguchi and multi-objective optimization methods. Reliable results are obtained by using multi-objective optimization methods, including both two of the response factors, which are expulsion and burring index and weld strength. In terms of welding process, the parameters such as weld current, electrode force and projection height are found to be the effective factors which minimize expulsion and burring defects, then optimized values of these parameters are defined.

Keywords: Projection welding, weld bolt, burring, Taguchi, multi-objective optimization

Geliş tarihi : 16.02.2016
Kabul tarihi : 20.05.2016

Biyik, A., İnce, U., Ateş, F., Yetilmezsoy, K. 2016. "Kaynak Civatalarının Projeksiyon Kaynağı ile Birleştirilmesinde Çapaklanmanın Azaltılmasına Yönelik Optimal Proses Parametrelerinin Taguchi ve Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemleriyle Tespit Edilmesi," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 677, s. 36-52.

1. GİRİŞ

Civata ve somun gibi bağlantı elemanlarının sac parçalara projeksiyon kaynağı ile birleştirilmesi sırasında eriyik metalin fişkirma sonucu parçalar üzerinde oluşan çapaklanma montajı zorlaştırmakta; montaj gerçekleşse dahi civata/somun dişlerine yapışan çapaklar, dişlerde sıyrılmaya yol açarak parçalarda işlev kaybına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, çapaklanma, özellikle kaplamalı parçalarda zamanla kaplamayı yüzeyden kaldırıp, en tehlikeli korozyon tiplerinden biri olan çukurcuk korozyonunun oluşumuna neden olmaktadır. Çukurcuk korozyonunun hızı, homojen korozyon hızından çok daha fazladır. Zaman içerisinde ilerleyen çukurcuk korozyonu, bağlantı elemanı üzerinde yüksek gerilme bölgelerinin oluşmasına ve çatlak başlangıcına sebep olmaktadır. Bu durum, bağlantı elemanının kırılmasına ve montajın boşalmasına yol açarak araç arızalarının yanı sıra, hasarlı ve/veya ölümlü trafik kazalarına dahi sebep olabilmektedir. Kaynaklı parçalarda çapak oluşumu hem yukarıda bahsedilen kritik nedenlerden hem de tespit edilmesi ve temizlenmesi için ek işçilik ve fazla malzeme kullanımı gibi ek maliyetler doğurması nedeniyle kesinlikle istenmemektedir [1].

Günümüzün global ekonomisinde yüksek kaliteli fakat düşük maliyetli ürün ve prosesler ayakta kalmanın anahtarı durumundadır. Kalite bilincine sahip işletmeler, maliyet ve performans üzerine rekabet etme isteği ile hareket ederek ürünlerinin tasarımını optimize etme (en iyileme) üzerine odaklanmaktadır. Ürün kalitesini geliştirmek için çeşitli yöntem ve teknikler kullanılmaktadır. Bunların önemli bir kısmı, ürünün performans karakteristiklerini tek tek ele alarak kaliteyi sağlamaya çalışmaktadır. Ancak söz konusu yaklaşımlar yeteri kadar etkin ve ekonomik değildir. Bu sebeple, iki veya daha çok yanıtı beraber analiz eden, ürünün kalitesi üzerindeki etkileri belirleyen ve en iyi kombinasyonlar ortaya koyan yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan Taguchi yöntemi, ürün ve proseste değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, üründe ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan deneysel bir tasarım yöntemidir [2]. Bu yöntem, ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç vermektedir. Bunun yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını öngörmektedir [3]. Taguchi Yöntemi'nde faktör seviyelerinin tespit edilmesinde; gözlem yöntemi, sıralama yöntemi, sütun farkları yöntemi, varyans analizi ve fark etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden birisi uygulanmaktadır [4]. Taguchi'nin deney tasarım yöntemi, farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu saptama adına oldukça yararlı bir yöntemdir [5, 6]. Taguchi'nin tam ve bütünlük sistemi, ürün ya da üretim süreci spesifikasyonlarını belirlemede ve

bu spesifikasyonlara göre üretilmesinde yardımcı olmaktadır. Taguchi yöntemi, esasen en iyileme tekniğinin sürekli, ayrık ve niteliksel tasarım değişkenli problemlerin çözümüne çok iyi uyan tipidir. Bu yüzden, herhangi bir yapay sinir ağı modeli bu yöntemle en iyilenebilir. Diğer yöntem olan genetik algoritma, çok fazla hesaplama maliyeti gerektirmektedir [7]. Çoklu kalite yanıtını en iyilemek, birçok üretici için giderek artan bir zorunluluktur. Ayrıca, çoklu yanıtlar eş zamanlı olarak niteliksel ve sayısal karakteristikleri içermeyebilir. Taguchi Yöntemi, niteliksel ve sayısal kalite karakteristiklerini içeren çok yanıtlı problemlere doğrudan uygulanamaz [8]. Ancak çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte uygulandığında birden fazla yanıtın eş zamanlı olarak en iyilenmesi sürecinde etkin sonuçlar vermektedir.

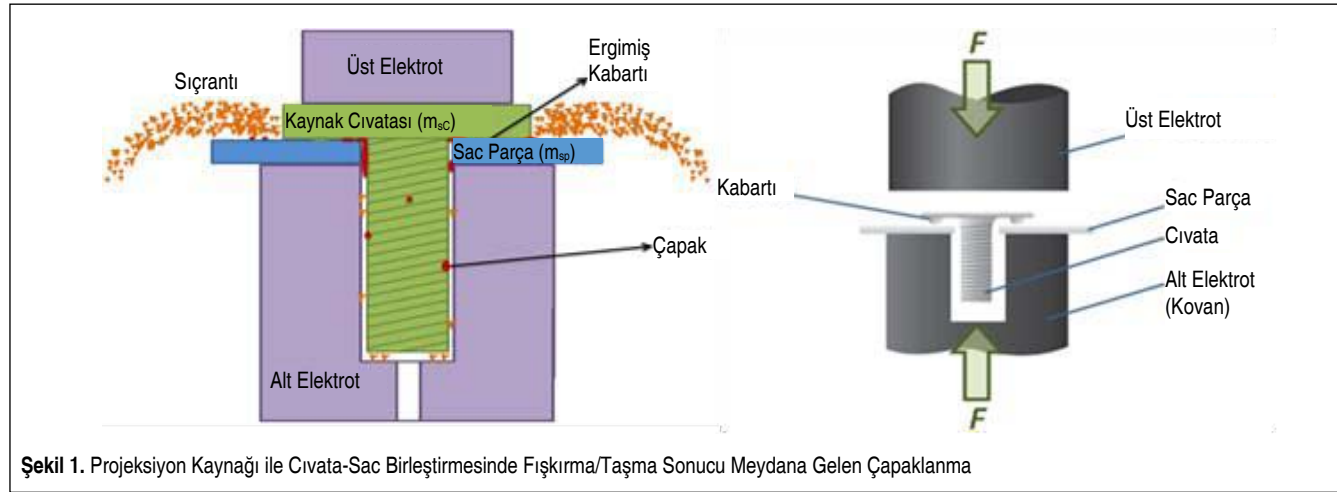
Taguchi Yöntemi ve istatistiksel veri analizinin çok sayıda imalat prosesine, parametrelerin optimizasyonu amacıyla uygulandığı literatürden izlenebilir. Örneğin, Taylan tarafından [9] tamamlanan yüksek lisans tez çalışmasındaki Taguchi deney tasarımının esasları incelenmiş; bu çalışmada, askeri bir fabrikada yakılan üç tip kimyasal maddenin günlük yakılan toplam miktarının maksimizasyonu için Taguchi Yöntemi'nden faydalanılmıştır. Bunun yanı sıra, Gökçe ve Taşgetiren [7], Hamzaçebi ve Kutay [10] ve Baynal [11] tarafından yayınlanan çalışmalar da Taguchi Yöntemi'nin esasları ve sistematığı hakkında pratiğe yönelik özet bilgiler sunulmaktadır. Canıyılmaz ve Kutay [2], Taguchi Yöntemi'nde varyans analizine (ANOVA'ya) alternatif bir yaklaşım olarak "Faktör Etkilerinin Grafiksel Gösterimi" yönteminin avantajlarını vurgulayan bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, şalter üretimi yapan bir firmada, şalter gövdelerinin termoset malzemedeki imalat parametrelerinin prosese ve gövde mukavemete etki dereceleri ANOVA ve grafiksel yöntemiyle belirlenerek karşılaştırılmış; optimum sonuçları sağlayan seviye kombinasyonları için grafiksel yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği açıklanmıştır. Singh ve Vijayakumar tarafından [12] yapılan çalışmada ise AISI 301L kalite paslanmaz çelik sacın nokta direnç kaynağında dayanım, çekirdek ebadı ve penetrasyon ile tanımlanan kaynak kalitesinin bir göstergesi olan çökme miktarı üzerinde durulmuştur. Parametre olarak akım şiddeti, çevrim sayısı, tutma ve soğutma sürelerinin etki dereceleri Taguchi yöntemi ile araştırılmış; parametre seviyeleri bu göstergeyi iyileştirecek şekilde optimize edilmiştir. Kuo vd. [13], çok kriterli benzetim problemlerinin optimal çözümünü bulma noktasında gri ilişkisel analiz tekniği ile Taguchi Yöntemini birlikte kullanmışlardır. Liao [14], çok kriterli benzetim en iyilemesinde TOPSİS ile Taguchi Yöntemini eş zamanlı olarak kullanmıştır. Huang ve Liao [15], elektrik teli boşaltım mekanizmasına ait faktörlerin en iyi seviye kombinasyonlarının tespit edilmesinde GRA ve Taguchi Yöntemini birlikte uygulamışlardır. Biswas vd. [16], çok yanıtlı toz altı ark kaynağı optimizasyonunda VIKOR ve Taguchi yöntemlerini bir-

likte uygulamışlardır. Çok yanıtlı bir deneysel çalışmadan bir- den fazla değişkene bağlı çıktılar bulunuyorsa, bu çıktıların çok dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Yanıt değişkenleri tekil ve birbirinden bağımsız olarak incelenmelidir. Birden fazla yanıt eş zamanlı olarak en iyilenmelidir [17]. Belirsiz faktörlere sahip tasarım değişkenlerinin mevcut olduğu durumlarda tüm yanıtları kapsayacak bir çözüm belirlenmelidir. Bu doğrultuda gerçekleştirilecek çözümde, tüm yanıtlar en iyilenir ve varyanslar en küçüklendir [18, 19].

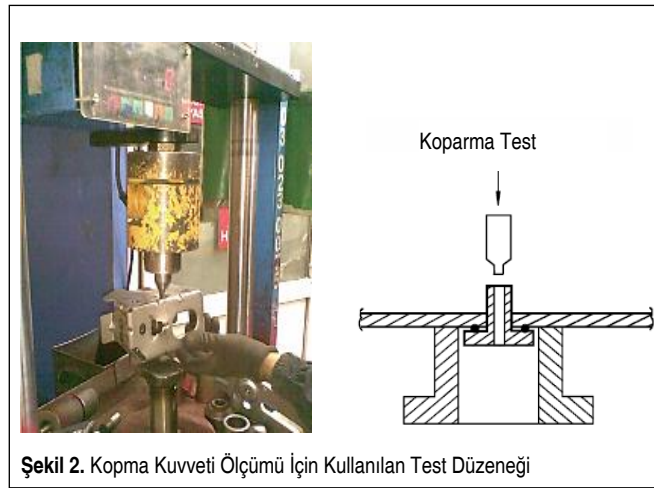
Projeksiyon kaynak prosesinin temsili gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Analizlerde iki adet performans karakteristiği yer almaktadır. Bunlar Erhuy vd. tarafından yapılan çalışmada önerilen [1] fişkırtma ve çapaklanma bileşik endeksi (E) ve kopma kuvveti (F_k)’dir. Fişkırtma endeksi, kaynak işlemi esnasında etrafa dağılan sıçrantıların, 0,1 mg hassasiyetindeki terazi ile ölçülen cıvata ve sac parçanın toplam kütle eksilmesini temsil etmektedir. Çapaklanma endeksi ise her bir çapağın tespiti, şekli ve geometrisine göre tasnif edilip, Erhuy vd. tarafından yapılan çalışmada önerilen metodolojiye göre belirlenmektedir. Her iki endeksten gelen değerlerin toplamı fişkırtma ve çapaklanma bileşik endeksi olarak belirlenmekte-

dir. Kopma kuvveti ölçümü için kullanılan test düzeneği Şekil 2’de gösterilmiştir. Kopma kuvveti ise kaynaklı bölge dayanımıdır, koparma testinde en az 2843,93 N (Newton) kopma kuvvetinin sağlanabilmesi benimsenmiştir [1].

Bu çalışmanın amacı, kaynak cıvatalarının projeksiyon kaynağı ile sac parçalara birleştirilmesi işlemlerinde malzeme özellikleri ve cıvatanın kaplama durumu, kabartı boyutları ve proses birincil ve ikincil parametrelerinden her birinin çapak oluşumuna etki derecesini doğru tayin edip optimum kombinasyonunu saptayarak, bağlantının mekanik performansından ödün vermeden çapak oluşumunu ortadan kaldırmak veya oluşum sıklığını en aza düşürmek; böylelikle procese uygun cıvatalar ve verimli kaynak prosesleri tasarlayabilmektir. Bu amaçla, Taguchi Yöntemi ile çok amaçlı optimizasyon yöntemleri birlikte kullanılarak çok yanıtlı performans karakteristiğine sahip projeksiyon kaynak işleminin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimal parametreler çerçevesinde her iki yanıt değişkeni için çoklu doğrusal regresyon analizi ile birlikte tahminleme sunulmuştur. Söz konusu yanıt faktörlerini eş zamanlı olarak analiz etmek ve ürün kalitesine etki eden parametrelerin farklı seviyeleriyle yapılan deneyler doğrultu-



Şekil 1. Projeksiyon Kaynağı ile Cıvata-Sac Birleştirmesinde Fişkırtma/Taşma Sonucu Meydana Gelen Çapaklanma



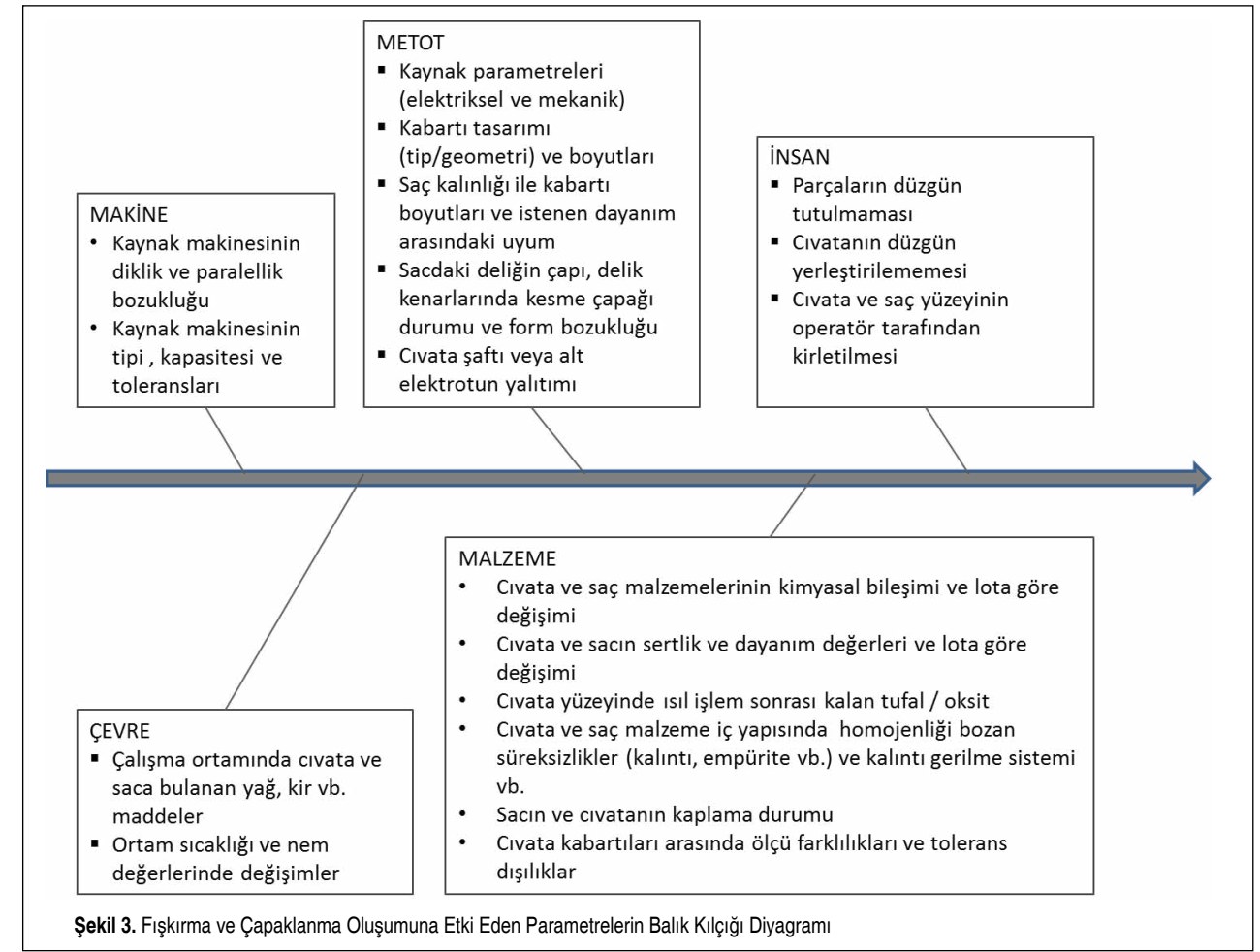
Şekil 2. Kopma Kuvveti Ölçümü İçin Kullanılan Test Düzeneği

sunda, hangi faktörlerin ve seviyelerinin en iyi performansı sağladığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon çalışması kompozit çekicilik fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir [20]. Bu yöntemin uygulanması esnasında ise LOQO/AMPL isimli algoritma, doğrusal regresyon denklemlerinin çözümünde kullanılmıştır [21].

2. YÖNTEM VE ANALİZ SONUÇLARI

2.1 Taguchi Yaklaşımı ile Deney Tasarımı ve Sonuçlar

Bu çalışmada, muz tipi kabartıya sahip, 20MnB4 çeliğinden soğuk dövme yöntemi ile üretilmiş kaplamasız ve Zn-Ni kaplamalı M8 kaynak cıvatalarının (8.8 kalite), kalınlığı 0,8 ve



Şekil 3. Fişkırtma ve Çapaklanma Oluşumuna Etki Eden Parametrelerin Balık Kılıçlı Diyagramı

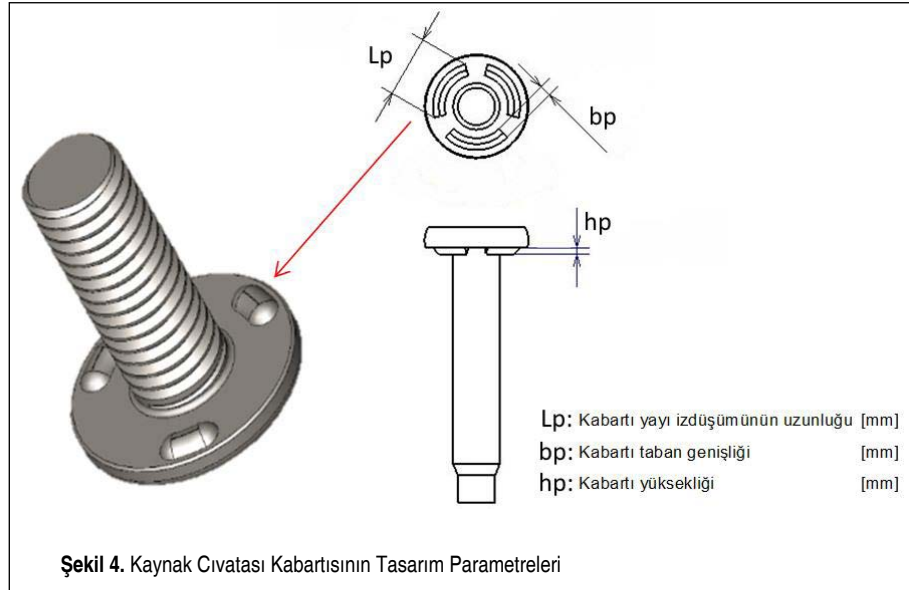
1,5 mm olan galvaniz kaplı DC 04 ve DP 600 çelik saclara kaynaklanmasında kabartı boyutları, akım, kuvvet, süre gibi parametrelerin çapaklanmaya olan etkisi araştırılmıştır. Projeksiyon kaynağında fişkırtma ve çapak oluşumuna etki eden parametreler ve sürece etki eden faktörler Şekil 3’te gösterilen balık kılıçlı diyagramı ile sınıflandırılmıştır.

Söz konusu faktörler nominal puanlama tekniğiyle sınıflandırılmış ve sürece etkisi fazla olduğu düşünülen faktörler çalışma prensip ve aralıkları da göz önünde bulundurularak seviyelendirilmiştir. Bu seviyelendirme sonucu 10 farklı etken, parametre olarak belirlenmiştir. Parametre seviyeleri 2 seviye olarak tespit edilmiş olup, yapılan ön projeksiyon kaynağı denemelerine göre endüstriyel olarak uygulanabilir

ve gerçekçi aralıkta seviye değerleri belirlenmiştir. Belirlenen faktörler ve seviyeleri Tablo 1’de verilmiştir. Deney tablosu da Tablo 2’de gösterildiği gibi, 2 seviyeli 10 kontrol faktörünü içeren bir yapıda L16 (2)¹⁰ ortogonal matrisine göre hazırlanmıştır. Burada sac malzeme tipi DC 04 ile DP 600 ve cıvata kaplama durumu kaplamalı (Zn-Ni) ve kaplamasızdır. Deney tablosu oluştururken uygun ortogonal matrisin belirlenmesi aşamasında faktörlerin sayısı ve toplam serbestlik dereceleri baz alınmaktadır. Seviye sayısının 2 ve parametreler arasında etkileşimin olmadığı göz önüne alındığında, her bir parametrenin serbestlik derecesi her bir seviye sayısının bir eksiğine eşit-

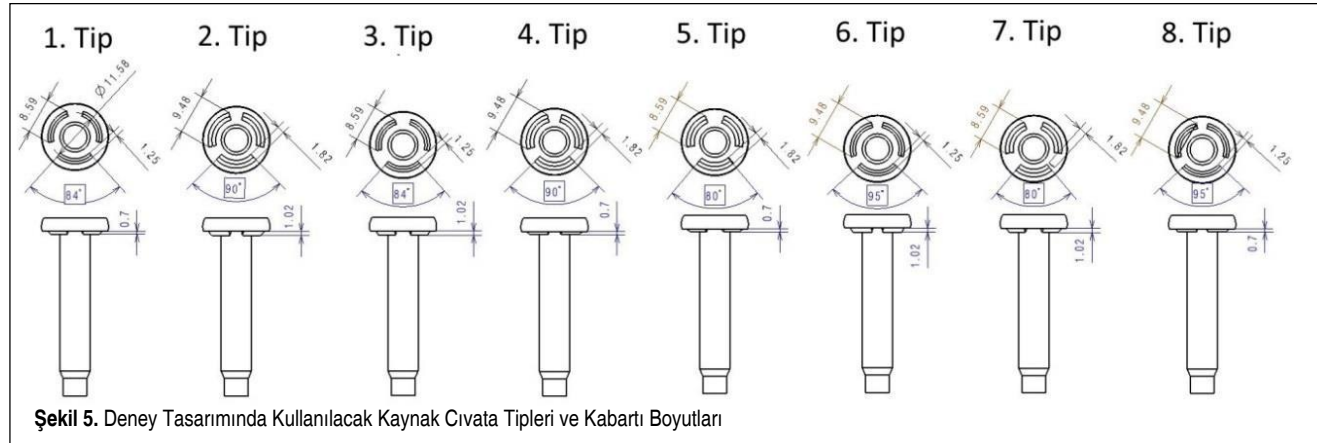
Tablo 1. Performans Karakteristikleri ve Faktör Seviyeleri

Sembol	Proses Parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2
X1	Kaynak akımı (I)	[kA]	14	20
X2	Kaynak süresi (tç)	[Çevrim]	2	4
X3	Elektrot kuvveti (Fe)	[N]	6648,91	10689,25
X4	Delik çapı (Ds)	[mm]	8,3	9
X5	Sac kalınlığı (s)	[mm]	0,8	1,5
X6	Sac malzeme tipi (SM)	-	0	1
X7	Kaynak cıvatası kaplama durumu (CK)	-	0	1
X8	Kabartı yayı izdüşümünün uzunluğu (Lp)	[mm]	8,59	9,48
X9	Kabartı taban genişliği (bp)	[mm]	1,25	1,82
X10	Kabartı yüksekliği (hp)	[mm]	0,7	1,02



Şekil 4. Kaynak Cıvatası Kabartısının Tasarım Parametreleri

tir. Buradan 10 adet parametreye sahip sistemin serbestlik derecesi 10 (10*(2-1)) olarak hesaplanmıştır. Böylece uygun ortogonal dizin, hesaplanan toplam serbestlik derecesinin bir fazlası olan L11 dizini olarak belirlenmiştir. Ancak deneysel tasarım ve sonrasında gerçekleştirilecek veri analizini daha güvenilir kılmak, regresyon analizi yapabilmek ve modelin geçerliliğini arttırmak amacıyla L16 dizini seçilmiştir. Şekil 4'te gösterilen cıvata tasarımı, teşkil eden üç parametrenin tablodaki yerleşimine göre imal edilmesi gereken cıvata çeşitliliği değişimini göstermektedir. Cıvata çeşitliliğini maksimum olarak elde etmek amacıyla, kaynak cıvatası kabartısının



Şekil 5. Deneysel Tasarımda Kullanılacak Kaynak Cıvata Tipleri ve Kabartı Boyutları

Tablo 2. Taguchi Yöntemi İçin Önerilen L₁₆(2)¹⁰ Deneysel Tasarım Matrisi

Deneysel No	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1

tasarım parametreleri deney tablosunun son üç kolonuna yerleştirilerek, 8 farklı tipte cıvataya ulaşılmıştır (Şekil 5).

8 farklı tipte cıvatanın kabartıları (Şekil 5), soğuk şekillendirme sonrası ısıl işlem uygulanıp cıvata 8.8 kalitesine ulaştırıldıktan sonra kalıp ve işçilik maliyetleri de göz önüne alınarak kabartılar nihai haline talaşlı imalat ile getirilmiştir.

Projeksiyon kaynak işleminde kullanılmak üzere 100 x100 mm² ölçüsünde hazırlanmış sac plakaların orta kısımlarına 8,3 ve 9 mm çapında delikler açılmıştır. Oluşturulan deney tasarımına göre testler yapılmış ve her denemeden 5 gözlem alınmıştır. Ölçümler sonrası hesaplanan kaynak fışkırmaya ve çapaklanma bileşik endeksi ile kopma kuvveti EK-1'de verilen çizelgeye yerleştirilmiştir. Her bir yanıt değeri için standart sapma değerleri hesaplanmış ve saçılmaların yüksek olduğu görülmüştür. Kaynak dayanım şartı olarak, kopma kuvveti en az 2843,93 N olarak belirlenmiştir.

Deneysel hata faktörlerinin çıktılar üzerindeki etkisini en az indirmek için, her grupta yürütülen 5 adet deneyden E de-

ğeri birbirine en yakın olan 3'ünün dikkate alınması; sıra dışı verilerin ait olduğu deneylerin ise analiz dışında tutulması uygun görülmüştür. Böylelikle E'nin standart sapması 0,61-3,76 aralığından 0,10-2,06 aralığına düşürülmüştür. Taguchi L₁₆(2)¹⁰ deneysel tasarım matrisi ile birlikte, 3 adet E verisi y_i= E(1), E(2), E(3), bunların ortalaması E_{ort}, standart sapma değerleri (σ), Sinyal/Gürültü oranları (S/N) hesaplanmıştır (EK-2). E değeri için performans karakteristiği olarak Taguchi deneysel tasarım metodunun "En küçük En iyi" kalite karakteristiği kullanılmıştır. En küçük en iyi kayıp fonksiyonu Eşitlik (1) ile verilmiştir;

$$S / N = -10 \log \left[1 / n \sum_{k=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Bu denklemde \bar{y} , gözlem değerlerinin ortalaması ve S² ise gözlem değerlerinin varyansdır. Gözlem değerleri (\bar{y}) ve gözlem değerler varyansı (S²) sırasıyla, Eşitlik (2) ve (3) kullanılarak hesaplanmaktadır. S/N oranı büyüdükçe, hedef etrafında ürün varyansı küçülmektedir [7].

$$S^2 = 1/(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

$$\bar{y} = 1/n \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

S/N oranlarına ek olarak, her bir parametre seviyesinin fışkırmaya ve çapaklanma üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla

Tablo 3. Parametrelerin Fışkırmaya ve Çapaklanma Bileşik Endeksine ait S/N Oranına Etkisi ve Optimum Seviye Değerlerinin Belirlendiği Yanıt Tablosu (Performans Karakteristiği: En Küçük - En İyi)

Parametre	S/N Değerleri		Maks - Min	Sıralama
	Seviye 1	Seviye 2		
I	-12,24	-20,91	8,66	1
tç	-16,35	-16,8	0,46	10
Fe	-20,41	-12,74	7,66	2
Ds	-17,37	-15,78	1,58	7
s	-15,86	-17,29	1,42	8
SM	-15,26	-17,89	2,63	5
CK	-15,25	-17,9	2,65	4
Lp	-15,67	-17,48	1,81	6
bp	-16,81	-16,34	0,47	9
hp	-15,05	-18,1	3,04	3

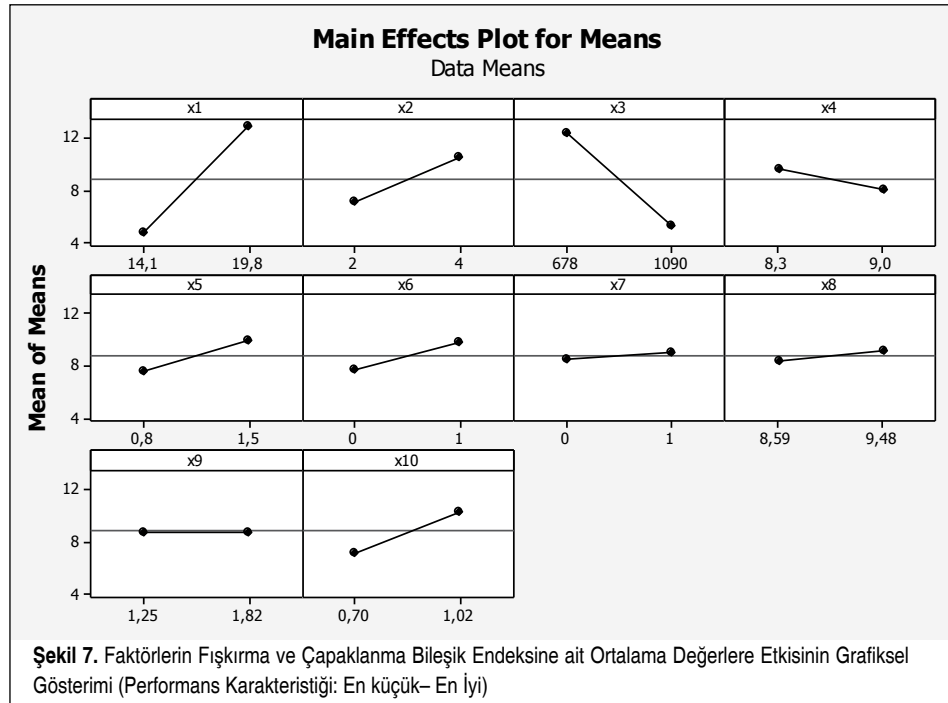
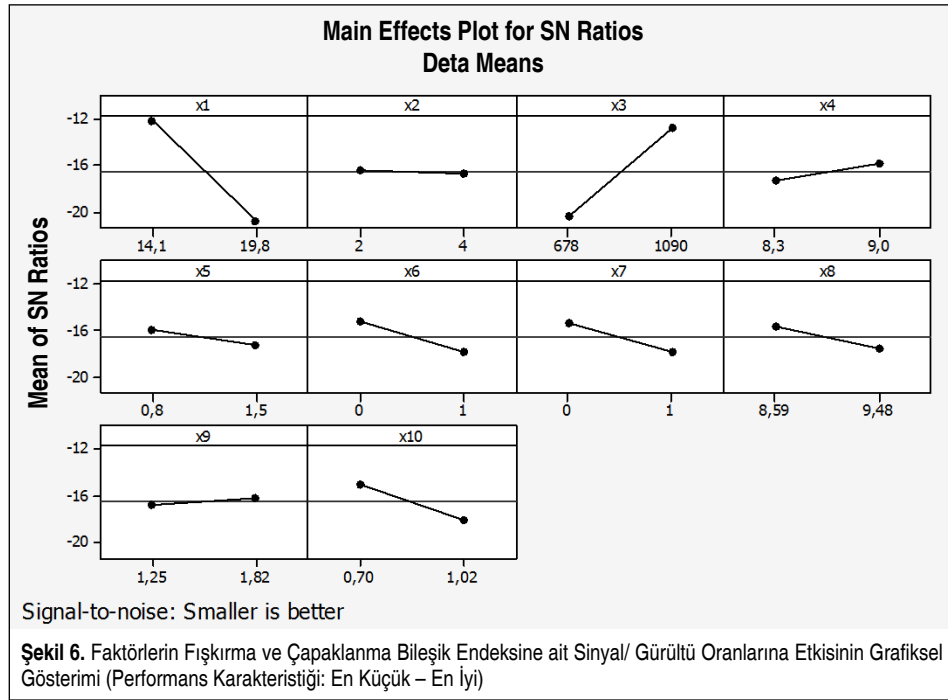
Tablo 4. Parametrelerin Fışkırmaya ve Çapaklanma Bileşik Endeksine ait Ortalamalarına Etkisi ve Bu Yönden Optimum Seviye Değerlerinin Belirlendiği Yanıt Tablosu (Performans Karakteristiği: En Küçük - En İyi)

Parametre	Ortalama Değerler		Maks - Min	Sıralama
	Seviye 1	Seviye 2		
I	4,65	12,97	8,31	1
tç	7,09	10,53	3,45	3
Fe	12,35	5,28	7,07	2
Ds	9,62	8	1,63	7
s	7,56	10,06	2,5	5
SM	7,76	9,86	2,1	6
CK	8,57	9,06	0,49	8
Lp	8,58	9,04	0,46	9
bp	8,74	8,88	0,14	10
hp	7,17	10,46	3,29	4

ilgili parametre seviyelerinin S/N ve ortalamaya göre karşılıkları Tablo 3 ve 4'te gösterilmiştir.

Etkin parametrelerin belirlenmesinde sütun etkisi metodu kullanılmaktadır [4, 5]. Örnek model olarak EK-2 gösterilirse, deneylere karşılık gelen ortalama değerleri ya da gürültü oranı (S/N) değerleri, I parametresinin 1. Seviyesine karşılık gelenler olarak toplanır. I parametresinin 2. seviyesine karşılık gelen ortalamalar ya da gürültü oranı değerleri de toplandıktan sonra, diğer seviyenin toplamından çıkarılır. Aradaki farkın işaretine bakılmaksızın, büyük farka sahip olan etkili olarak seçilir [5].

Şekil 6 ve Şekil 7'deki grafikler incelendiğinde, genel olarak seçilen parametrelerin E değeri üzerinde etkin olduğu görülmüştür. Faktör seviyelerinin tespit edilmesinde, sonuca etki etme derecelerinin dikkate alınması gereklidir (Tablo 3). Her faktörün seviyelerinde değişim incelenip önem sırası dikkate alınarak parametreler sıralandığında, bunlardan I, Fe, tç, hp'nin yanıt üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Söz konusu bu parametrelerdeki küçük bir değişim, fışkırmaya ve çapaklanma üzerinde önemli bir değişime sebep olacaktır. Örneğin I parametresinin Seviye 2'deki ortalama etkisi -12,24 dB ile en küçükken, Seviye 1'deki ortalama etkisi -20,91 dB ile en büyük çıkmıştır. İki seviye arasındaki fark 8,66 dB'dir. I parametresinin yanıt faktörü üzerindeki oldukça etkin bir faktör olduğu görülmüştür. bp parametresinin ise seviyeler arası farkı 0,14 gibi çok küçük bir değerdir ve Tablo 3 ve 4'te açıkça görüldüğü gibi, bu parametrenin yanıt faktörü üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır. Faktör seviyelerine göre hesaplanan parametreler, en büyük ile en küçük değer arasındaki farklara göre sıralanmıştır. S/N'e ve ortalamaya göre parametrelerin önem dereceleri Tablo 5'te verilmiştir.



Taguchi ile yapılan deney tasarımının varyans analizi hem ortalamaya göre hem de gürültü oranı değerine göre yapılabilir [5]. Faktör etkilerinin grafiksel gösterim yönteminden sonra, E değerleri için, EK-2’de verilen veri setiyle varyans analizi (ANOVA) çalışması yürütülmüş; bu süreçte güven testi olarak Fisher’in F-testi uygulanmıştır. Söz konusu çalışmada, 16 adet deney yapılmış ve her deney seti 3 defa tekrar edilerek toplamda 48 gözlem alınmıştır. Tablo 6 ANOVA tablosu program çıktısı temel alınarak düzenlenmiştir. Burada X_i parametre, SS her bir parametre için kareler toplamı, PC yüzdesel katkısı, ns seviye sayısı, df serbestlik derecesi ve MSS her parametreden kaynaklanan bireysel sapmaların ortalama karesel toplamıdır. Tüm matris için $F_{hesap}=9,634675$ olarak hesaplanan oranın, %95 güven ($\alpha=0,05$) düzeyinde F tablosunda 4,735 değerinden büyük olduğu görülmektedir. Anlamlılık değeri ise $p=0,010996$ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, $F_{hesap}=9,634675 > F_{tablo}=4,735$ ve $p=0,010996 < \alpha=0,05$ şeklinde elde edildiği için, F testi, %95 düzeyindeki ($\alpha=0,05$) güven aralığında istatistiksel yönden anlamlı bir sonuç vermiş; %95 kesinlikte sonuçlandırılan Fisher’in F testi, regresyon modelinin, bağımlı değişkenlerde anlamlı bir miktarda değişimi açıkladığını işaret etmiştir. Hipotezler H_0 ve H_1 olarak tanımlanmıştır. H_0 hipotezi $\alpha=0,10$ anlamlılık düzeyinde $p>\alpha$ olduğu için reddedilir. Bu sonuçlara göre X_4, X_6, X_7, X_8, X_9 faktörlerinin yanıt faktörü olan fıskırma ve çapaklanma endeksi oluşumunda etkisinin olmadığı görülmüştür. H_0 hipotezi $\alpha=0,10$ anlamlılık düzeyinde $p<\alpha$ olduğu için $X_1, X_2, X_3, X_5, X_{10}$ faktörlerinin yanıt faktörü üzerinde etkisinin olduğu görülmüştür.

H_0 : Faktörlerin yanıt faktörü üzerinde etkisi yoktur $\rightarrow \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$

H_1 : Faktörlerin yanıt faktörü üzerinde etkisi vardır \rightarrow En az iki $\mu_i \neq \mu_j, i \neq j$

Uygulanan Taguchi Yöntemi’nde optimal fıskırma ve çapaklanma bileşik endeksi (E_{opt}), Eşitlik (4) ile hesaplanan optimal Sinyal/Gürültü oranı ($(S/N)_{opt} = -1,38$ dB değerinin Eşitlik (1)’de yerine konması ile 1,17 olarak tahmin edilmiştir. Buradaki $(S/N)_{opt}$ ise EK-2 ile verilen deneysel tasarım matrisindeki tüm S/N oranlarının ortalaması olarak -16,58 dB değeriyle hesaplanmıştır.

$$(S/N)_{opt} = (S/N)_{ort} + [\max(S/N)_i - (S/N)_{ort}] + [\max(S/N)_{tc} - (S/N)_{ort}] + [\max(S/N)_{bp} - (S/N)_{ort}] + [\max(S/N)_{hp} - (S/N)_{ort}] \quad (4)$$

Tablo 5. S/N ve Ortalamaya Göre Veri Analizi

Parametre	Sıralama	S/N'ye Göre			Parametre	Sıralama	Ortalamaya Göre		
		No	Değer	Birim			No	Değer	Birim
I	1	1	14,1	kA	I	1	1	14,1	kA
tç	10	1	2	Çevrim	tç	3	1	2	Çevrim
Fe	2	2	10689.25	N	Fe	2	2	10689.25	N
Ds	7	2	9	mm	Ds	7	2	9	mm
s	8	1	0,8	mm	s	5	1	0,8	mm
SM	5	1	DC 04	-	SM	6	1	DC 04	-
CK	4	1	Kaplamasız	-	CK	8	1	Kaplamasız	-
Lp	6	1	8,59	mm	Lp	9	1	8,59	mm
bp	9	2	1,82	mm	bp	10	1	1,25	mm
hp	3	1	0,7	mm	hp	4	1	0,7	mm
E için optimum proses parametreleri									
Seviye					S/N				
$I_1FE_2hp_1CK_1SM_1Lp_1Ds_2s_1bp_2tç_1$					-1,38				

Tablo 6. ANOVA Çalışmasında Tüm Parametreler İçin Elde Edilen F Testi Sonuçları

Parametre	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PC [%]	ns
X1	1	276,47	276,47	276,47	42,7	0,001	42,23	2
X2	1	47,484	47,484	47,484	7,33	0,042	7,25	2
X3	1	200,01	200,01	200,01	30,89	0,003	30,55	2
X4	1	10,568	10,568	10,568	1,63	0,257	1,61	2
X5	1	25,025	25,025	25,025	3,87	0,106	3,82	2
X6	1	17,661	17,661	17,661	2,73	0,16	2,7	2
X7	1	0,965	0,965	0,965	0,15	0,715	0,15	2
X8	1	0,833	0,833	0,833	0,13	0,735	0,13	2
X9	1	0,074	0,074	0,074	0,01	0,919	0,01	2
X10	1	43,242	43,242	43,242	6,68	0,049	6,6	2
Hata	5	32,372	32,372	32,372	6,474		4,95	
Toplam	15	654,708					100	16

2.1.2 Regresyon Analizi ve Sonuçlar

Analize tabi tutulan fıskırma ve çapaklanma bileşik endeksi ve kopma kuvveti verileri EK-3’te verilmiştir. Toplam 5 adet E verisinden sıra dışı olanlar ayıklanarak birbirine yakın 3 adet veri seçilmiştir. Bir özdeşlik sağlanabilmesi için, sıra dışılık sergileyen Fk verilerinin ait olduğu deneyler de analiz dışında tutulmuştur.

E ve Fk verileri için mevcut veri seti kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve çoklu doğrusal regresyon modelleri elde

edilmiştir. Çoklu regresyon analizi kapsamında 2 temel amaç bulunmaktadır; Bunlardan birincisi, kolay elde edilebilir bağımsız değişkenler yardımıyla bağımlı değişken değerini tespit etmek, ikincisi ise bağımsız değişkenlerden hangisi ve hangilerinin bağımlı değişkeni daha çok etkilediğini belirlemektir [22]. Fıskırma ve çapaklanma endeksi için regresyon analizi sonucunda elde edilen model Eşitlik (5)’te verilmiştir:

$$E = -7,0 + 1,44x_1 + 1,67x_2 - 0,0172x_3 - 2,21x_4 + 3,52x_5 + 2,10x_6 + 0,54x_7 + 0,77x_8 - 0,09x_9 + 9,84x_{10}, R^2 = 0,95 \quad (5)$$

Analiz sonucunda, model anlamlı çıkmış ($p < 0,05$) ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin %95'ini açıkladığı görülmüştür (Tablo 7).

Bağımsız değişkenlerin anlamlılık düzeylerine bakıldığında, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9 parametreleri ($p > 0,10$) anlamsız çıkmış, diğer bağımsız değişkenler ise bu koşul kapsamında anlamlı çıkmıştır. X_3, X_4, X_9 parametrelerinin E değeri arasında negatif yönlü bir ilişki var iken diğer parametrelerle arasında pozitif yönlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Bağımlı değişkeni açıklamada Akım, Kuvvet, Kabartı Yüksekliği ve Sürenin etkin parametreler olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Regresyon ana-

Tablo 7. Regresyon Analizi: Anova

Model	DF	SS	MS	F	P
Regresyon	10	609,871	60,987	9,6	0,011
Hata	5	31,761	6,352		
Toplam	15	641,632			

Tablo 8. Regresyon Analizi: Katsayılar

	Katsayı	SE Katsayı	T	P	VIF
Sabit	-6,97	21,44	-0,33	0,758	
x1	1,4441	0,2211	6,53	0,001	1
x2	1,6706	0,6301	2,65	0,045	1
x3	-0,01716	0,003059	-5,61	0,002	1
x4	-2,213	1,8	-1,23	0,274	1
x5	3,52	1,8	1,96	0,108	1
x6	2,099	1,26	1,67	0,157	1
x7	0,541	1,26	0,43	0,685	1
x8	0,765	1,416	0,54	0,612	1
x9	-0,09	2,211	-0,04	0,969	1
x10	9,84	3,938	2,5	0,055	1

Tablo 9. Regresyon Analizi: Anova

Model	DF	SS	MS	F	P
Regresyon	10	3289247	328925	5,41	0,038
Hata	5	303974	60795		
Toplam	15	3593221			

lizinde yer alan değişkenler arasında çoklu bağıntı probleminin araştırılmasına yönelik olarak VIF değerleri incelenmiş, Tablo 8'de görüldüğü üzere, bu değerler 1 olarak bulunmuş ve bağımsız değişkenler arasında yüksek düzeyli korelasyon olmadığı görülmüştür. ($VIF < 10$). Bu durum analizde çoklu bağıntı probleminin olmadığını göstermektedir. Çoklu bağıntı, bağımsız değişkenlerin birbiriyle ilişki içinde olduğunu göstermekte ve bu şekilde bir ilişkinin olması, değişkenlerden birinin modele ek bir katkı getirmediğine dikkat çekmektedir [23].

Analize yönelik olarak veri seti içinde aykırı değer bulunmamaktadır. Doğrusallık ve normallik varsayımlarını inceleyebilmek amacıyla, artık değerler kullanılarak Şekil 8'de gösterilen grafikler çizdirilmiştir. Bakiye değerler, gözlenen y değeri ile kestirilen y değeri arasındaki farktır ve söz konusu bu değer ne kadar küçük olursa modelin o derecede veriyi sağladığı söylenebilir. Regresyon analizinde artıkların normal dağılımı ve bakiye değerlere ilişkin varyanslarında homojen olduğu görülmüştür. Şekil 8'de görüldüğü üzere, normal bir dağılım söz konusudur ($p > 0,05$). Grafik incelediğinde, noktaların bir doğru üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Kopma yükü için regresyon analizi sonucunda elde edilen model Eşitlik (6)'da verilmiştir.

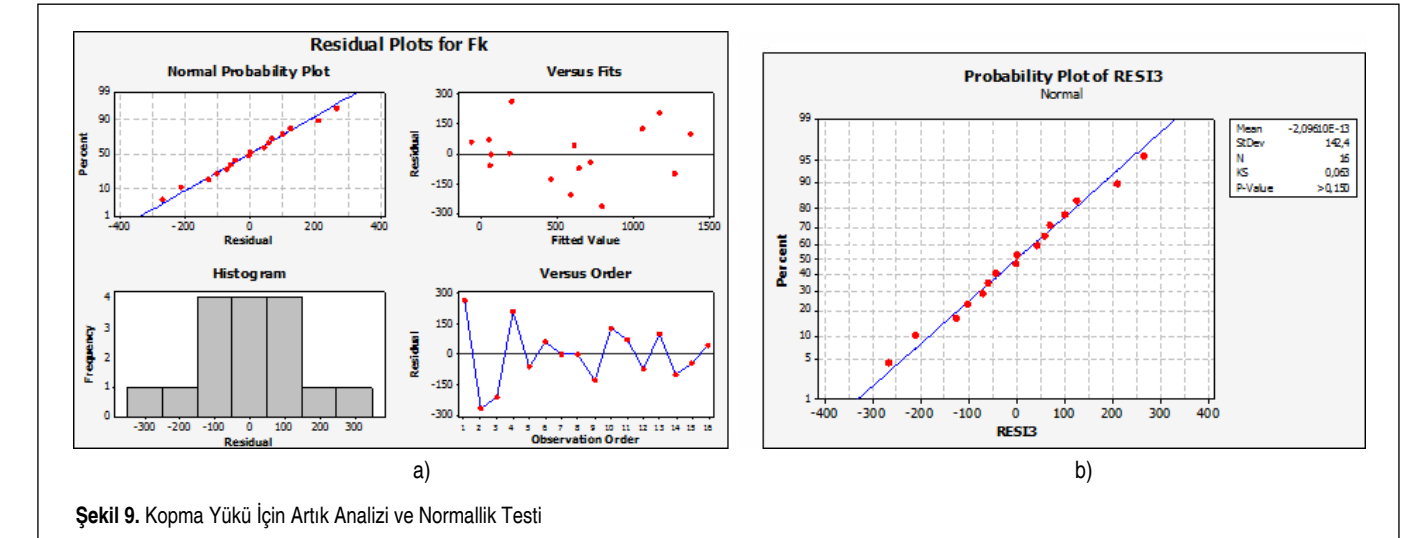
$$Fk = -1665 + 69,5x_1 - 46,3x_2 - 1,30x_3 - 198x_4 + 564x_5 + 125x_6 + 3x_7 + 268x_8 - 8x_9 + 1098x_{10}, R^2 = 0,916 \quad (6)$$

Analiz sonucunda, model anlamlı çıkmış ($p < 0,05$) ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin %91,5'ni açıkladığı görülmüştür (Tablo 9).

Tablo 10. Regresyon analizi: Katsayılar

	Katsayı	SE Katsayı	T	P	VIF
Sabit	-1665	2097	-0,79	0,463	
x1	69,5	21,63	3,21	0,024	1
x2	-46,31	61,64	-0,75	0,486	1
x3	-1,2976	0,2992	-4,34	0,007	1
x4	-198	176,1	-1,12	0,312	1
x5	564,1	176,1	3,2	0,024	1
x6	125,1	123,3	1,01	0,357	1
x7	2,6	123,3	0,02	0,984	1
x8	267,6	138,5	1,93	0,111	1
x9	-7,7	216,3	-0,04	0,973	1
x10	1098	385,3	2,85	0,036	1

minimize edecek optimal seviye kombinasyonu tahminleri yapılmış, E ve Fk için regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve süreçte yer alan parametrelerin bu performans karakteristikleri üzerindeki etkisi görülmüştür. Ancak uygulanan bu yöntemlerde E ve Fk yanıtları eş zamanlı olarak incelenememiştir. Bu nedenle, uygulanan veri analizlerinden tahmin edilen optimal seviye kombinasyonu ile yürütülen kaynak işlemlerinde yeterli dayanımın ($Fk > 2843,93$ N) sağlanması beklenmemektedir. Kaynak dayanımının da veri analizine dahil edilmesi, aslında E ile Fk verileri için bir optimizasyon problemi. Bu problem, parametrelerin, E değerini minimize, Fk değerini maksimize eden seviye kombinasyonu için tahmin yapılmasını amaçlamaktadır. Fıskırma ve çapaklanma bileşik endeksi ve kopma kuvveti değerlerini eş zamanlı analiz ile



Şekil 9. Kopma Yükü için Artık Analizi ve Normallik Testi

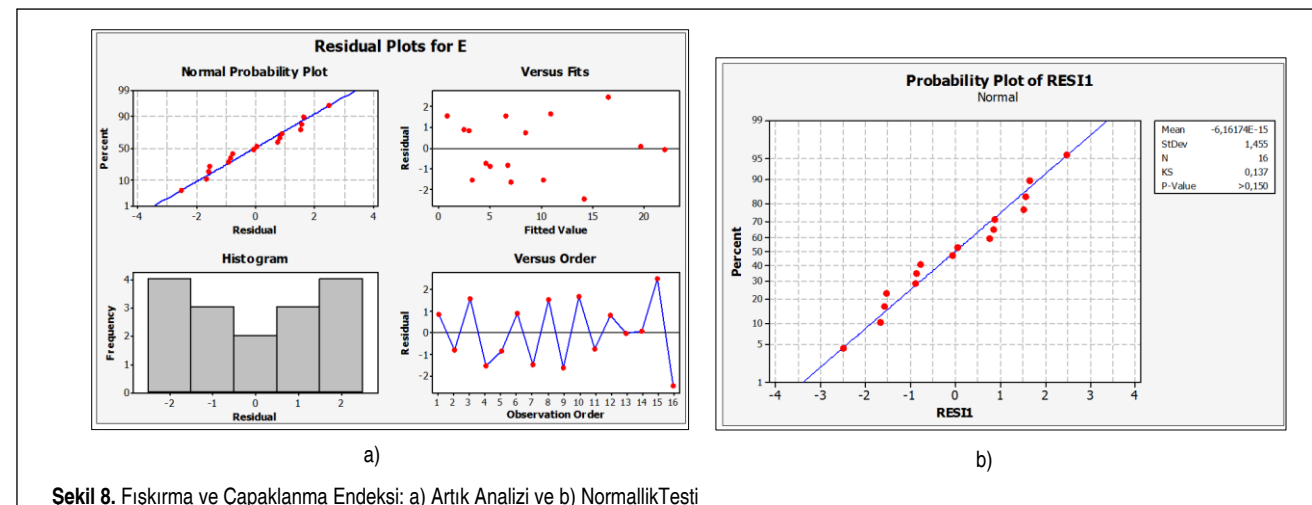
Bağımsız değişkenlerin anlamlılık düzeylerine bakıldığında, $X_2, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9$ parametreleri ($p > 0,10$) anlamsız çıkmış, diğer bağımsız değişkenler ise bu koşul kapsamında anlamlı çıkmıştır. Bağımlı değişkeni açıklamada kuvvet, akım, kabartı yüksekliği ve sac kalınlığının etkin parametreler olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Regresyon analizinde yer alan değişkenler arasında çoklu bağıntı probleminin araştırılmasına yönelik olarak VIF değerleri incelenmiş, Tablo 10'da görüldüğü üzere çoklu bağıntı sorunu görülmemiştir. Bu çerçevede, Şekil 9'da görüldüğü üzere normal bir dağılım söz konusudur ($p > 0,05$). Grafik incelediğinde, noktaların bir doğru üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir.

2.2 Kompozit Çekicilik Fonksiyonu Yaklaşımı ile Çok Amaçlı Optimizasyon ve Sonuçlar

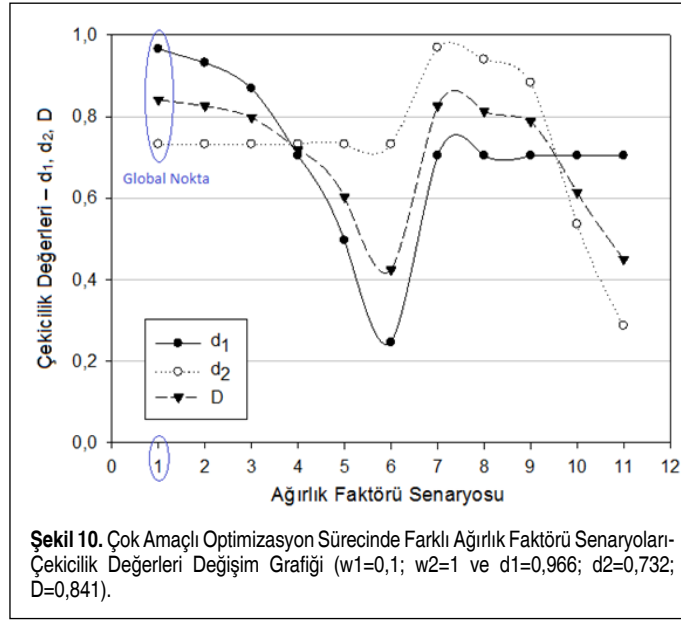
Yapılan analizler neticesinde, projeksiyon kaynağında fıskırma ve çapaklanmaya etki eden parametreler, etkinlik dereceleri ile birlikte ortaya koyulmuştur. Aynı zamanda, E değerini

Tablo 11. Fıskırma ve Çapaklanma Bileşik Endeksi ve Kaynak Kopma Yükünün Çok Amaçlı Optimizasyon Sürecinde Oluşturulan Senaryolarda Ağırlık Faktörleri ve Belirlenen Çekicilik Değerleri

Senaryo No	Ağırlık Faktörleri		Çekicilik Değerleri		
	w1	w2	d1	d2	D
1	0,1	1	0,966	0,732	0,841
2	0,2	1	0,932	0,732	0,826
3	0,4	1	0,869	0,732	0,798
4	1	1	0,704	0,732	0,718
5	2	1	0,496	0,732	0,603
6	4	1	0,246	0,732	0,424
7	1	0,1	0,704	0,969	0,826
8	1	0,2	0,704	0,940	0,813
9	1	0,4	0,704	0,883	0,788
10	1	2	0,704	0,536	0,614
11	1	4	0,704	0,287	0,450



Şekil 8. Fıskırma ve Çapaklanma Endeksi: a) Artık Analizi ve b) Normallik Testi



Şekil 10. Çok Amaçlı Optimizasyon Sürecinde Farklı Ağırlık Faktörü Senaryoları-Çekicilik Değerleri Değişim Grafiği (w1=0,1; w2=1 ve d1=0,966; d2=0,732; D=0,841).

Tablo 12. Kompozit Çekicilik Yaklaşımına Göre Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Optimizasyon Sonuçları

I	tç	Fe	Ds	s	SM	CK	Lp	bp	hp	E _{opt}	F _{k-opt}
14,1 kA	2 Çevrim	7472,67 N	8,3 mm	1,5 mm	DC 04	Kaplamasız	9,48 mm	1,25 mm	1,02 mm	7,7	10620,6 N

optimize edebilmek amacıyla kompozit çekicilik fonksiyonu yaklaşımına dayalı “Çok Amaçlı Optimizasyon” yöntemi uygulanmıştır [20]. Bu yaklaşımın her iki yanıt faktörü için DataFit (v8.1.69) mühendislik programı kullanılarak doğrusal regresyon modelleri geliştirilmiş ve LOQO/AMPL algoritması vasıtasıyla model değişkenlerinin optimum değerleri tespit edilmiştir [21]. Burada amaç; E değerinin minimum olması, F_k değerinin ise eş zamanlı olarak maksimum düzeyde olmasıdır. 11 farklı senaryo farklı ağırlık değerleri çerçevesinde çalıştırılmıştır. Her bir senaryo için ağırlık faktörü (w değerleri) Tablo 11’de verilmiştir.

Tanımlanan senaryolarda analiz çıktılarında 35 adet iterasyonun sonucunda ulaşılmıştır. Yapılan eş zamanlı analizler, 1 numaralı senaryodaki ağırlık faktörlerinden belirlenen çekicilik (d_1 , d_2 ve D) değerleriyle global nokta tanımlanmasının yapılabildiği görülmüştür. Global çekicilik endeksi olan D değeri, d_1 ve d_2 çekicilik endekslerinin ağırlıklı geometrik ortalamasına en yakın değeri 1 numaralı senaryo ile sağlamıştır. Bu senaryoda 31 adet iterasyon ile sonuca gidilmiş olup, analiz sonucu Şekil 10’da verilmiştir.

Kompozit çekicilik fonksiyonu yaklaşımıyla gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyonda, parametrelerin optimal seviye kombinasyonları ile birlikte, bu kombinasyon için fişırma ve çapaklanma bileşik endeksi E_{opt} ve kaynak kopma yükü F_{k-opt}

değerleri Tablo 12’de verilmiştir.

3. DOĞRULAMA DENEYLERİ

3.1 Doğrulama Deneyleri İçin Kaynak Cıvatası Prototiplerinin İmalatı

Gerçekleştirilen istatistiksel analiz ve çok amaçlı optimizasyon çalışmaları neticesinde, kaynak cıvatası kaplama durumu ve geometrik ölçüleri kapsamında 3 farklı optimal seviye kombinasyonu için 3 farklı kaynak cıvatası imal edilmiştir. Söz konusu parametrelere ilişkin seviyeler aşağıda verilmiştir.

- Taguchi- Faktör Etkilerinin Grafikselsel Gösterim Yöntemi (S/N’ye Etki) CK: Kaplamasız (0); Lp: 8,59 mm; bp: 1,82 mm; hp: 0,70 mm
- Taguchi-Faktör Etkilerinin Grafikselsel Gösterim Yöntemi (Ortalamaya Etki) CK: Kaplamasız (0); Lp: 8,59 mm; bp: 1,25 mm; hp: 0,70 mm

- Kompozit Çekicilik Fonksiyonu Yaklaşımına Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi CK: Kaplamasız (0); Lp: 9,48 mm; bp: 1,25 mm; hp: 1,02 mm

3.2 Doğrulama Deneyleri ve Sonuçları

Doğrulama deneyleri, 3 farklı yöntemin analiz sonuçlarını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 10 farklı parametre için optimal seviye kombinasyonları ve bu koşullarda fişırma ve çapaklanma bileşik endeksi ile kopma yükü değerleri tahmin edilmiştir. Önceki adımlarda olduğu gibi, sac-cıvata projeksiyon kaynak işlemleri öncesi ve sonrasında hassas terazi ile kütle ölçümü yapılmış ve aradaki farktan E değerleri hesaplanmıştır. Akım ve elektrot kuvveti değerleri, yine kaynak işlemleri esnasında ölçülerek bir tolerans dahilinde doğrulanmıştır. Tüm gruplarda deneyler 5 kez tekrar edilmiştir. Tüm numuneler, tartım sonrasında koparma testine tabi tutulmuştur.

Taguchi Yöntemi kapsamında, S/N oranlarına ve deneysel veri ortalamalarına göre gerçekleştirilen faktör etkilerinin grafikselsel gösterim yöntemi ve Anova analizi ile faktör seviyeleri ve etkinliklerine göre sıralamaları $I_1 FE_2 hp_1 CK_1 SM_1 Lp_1 Ds_2 s_1 bp_2 tç_1$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen deneyler tekrarlanmıştır (Tablo 13).

Tablo 13. Doğrulama Deney Sonuçları

Deney No	Ölçülen Akım [kA]	Kaynak Süresi [Çevrim]	Elektrot Kuvveti [N]	m0	m1	Kütle Farkı [g]	Kopma Kuvveti [N]	E
MO-1	12,9	2	10738,28	77,0773	77,0751	0,0022	509,95	2,2
MO-2	13,6	2	10738,28	78,1154	78,1132	0,0022	647,24	2,2
MO-3	14,4	2	10738,28	77,6007	77,5966	0,0041	1333,70	4,1
MO-4	14,2	2	10591,2	77,1122	77,109	0,0032	1372,93	3,2
MO-5	14,1	2	10738,28	77,4612	77,456	0,0052	1098,34	5,2

Tablo 14. Doğrulama Deney Sonuçları

Deney No	Ölçülen Akım [kA]	Kaynak Süresi [Çevrim]	Elektrot Kuvveti [N]	m0	m1	Kütle Farkı [g]	Kopma Kuvveti [N]	E
MO-1	14,1	2	7453,1	133,8477	133,839	0,0087	5256,36	8,7
MO-2	14	2	7453,1	132,9848	132,979	0,0058	5413,27	5,8
MO-3	14	2	7404,02	133,6691	133,6629	0,0062	4766,03	6,2
MO-4	14	2	7433,44	132,2847	132,28	0,0047	4354,15	4,7
MO-5	14,1	2	7453,05	133,5487	133,5389	0,0098	5413,27	9,8

Tablo 15. Optimizasyon Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırması

	PARAMETRELERİN OPTİMAL SEVİYE KOMBİNASYONU	TAGUCHI GRAFİKSEL (S/N)	TAGUCHI GRAFİKSEL (ORTALAMALAR)	ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON KOMPOZİT ÇEKİCİLİK
		I: 14,1 kA	I: 14,1 kA	I: 14,1 kA
tç: 2 Çevrim	tç: 2 Çevrim	tç: 2 Çevrim	tç: 2 Çevrim	
Fe: 10689,25 N	Fe: 10689,25 N	Fe: 7472,66 N	Fe: 7472,66 N	
Ds: 9,0 mm	Ds: 9,0 mm	Ds: 8,3 mm	Ds: 8,3 mm	
s: 0,8 mm	s: 0,8 mm	s: 1,5 mm	s: 1,5 mm	
SM: DC 04	SM: DC 04	SM: DC 04	SM: DC 04	
CK: Kaplamasız	CK: Kaplamasız	CK: Kaplamasız	CK: Kaplamasız	
Lp: 8,59 mm	Lp: 8,59 mm	Lp: 9,48 mm	Lp: 9,48 mm	
bp: 1,82 mm	bp: 1,25 mm	bp: 1,25 mm	bp: 1,25 mm	
hp: 0,70 mm	hp: 0,70 mm	hp: 1,02 mm	hp: 1,02 mm	
ANALİZLERDEKİ VERİ GRUPLARINDA	σE	0,10 - 2,06	0,10 - 2,06	0,10 - 2,47
STANDART SAPMA ARALIĞI	σF_k	-	-	0 - 4481,64 N
TAHMİN	E	1,17	-	7,72
	F_k	-	-	10620,60 N
DOĞRULAMA DENEY SONUÇLARI	E	3,94	3,28	7,04
	F_k	2549,73 N	2579,15 N	5040,62 N
DOĞRULAMA DENEYLERİNDE STANDART SAPMA	σE	1,37	1,02	2,13
	σF_k	1441,57 N	460,91 N	470,72 N
KAYNAK KOPMA KUVVETİ UYGUNLUĞU ($F_k > 2843,93$ N)		UYGUN DEĞİL	UYGUN DEĞİL	UYGUN

Gözlemlerin ortalama değeri 3,38 olarak bulunmuş ve numuneler incelendiğinde, herhangi bir çapaklanma olmadığı görülmüştür. MO-01 ve MO-02 deney sonuçları ile minimum E değeri hesaplanmıştır. ($E < 5$). Doğrulama deney sonuçları ile analiz sonuçları uyum içindedir. Kopma testi sonucu elde edilen Fk değerleri incelenmiş, ancak söz konusu optimal kombinasyonun kaynak dayanım şartını sağlamadığı görülmüştür. ($Fk < 2843,93$ N). Taguchi Yöntemi'nde E ve Fk verileri birlikte analize tabi tutulmadığı için sadece fişkırtma ve çapaklanmayı minimize eden parametre kombinasyonları elde edilmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon çalışmasında tahmin edilen optimal parametre seviyeleri için uygun koşullar oluşturularak gerçekleştirilen deneylerde de incelenen numunelerde hiçbir şekilde çapak gözlenmemiştir. Kaynaklı numunelere, ağırlık ölçümü tamamlandıktan sonra koparma testi uygulanmıştır. Doğrulama test sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Gözlemlerin ortalama değeri 7,04 olarak bulunmuş ve numuneler incelendiğinde herhangi bir çapaklanma olmadığı görülmüştür ($E < 10$). Deneylerde 2843,93 N kopma yükü ön şartı sağlanmıştır. İstatiksel veri analizine nazaran tahmin edilen ile deney sonucu ölçümler neticesinde hesaplanan E değerleri birbirine daha yakın çıkmıştır.

Doğrulama deneyleri sonucunda, Taguchi Yöntemi ile belirlenen optimal kombinasyon Tablo 14'te görüldüğü gibi, minimum E ($E < 5$) koşulunu sağlamış; ancak 2843,93 N kaynak dayanım koşulunu sağlamamıştır. Fk değerleri analize bu aşamada dahil edilmediği için bu beklenen bir durumdur ve dolayısıyla Tablo 14'te yer alan ilk iki seçenek kabul görmemiştir. Bu aşamada, yer alan çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen varyans analizi (Anova) fişkırtma ve çapaklanmaya etki eden faktörleri, katkı yüzdeleri ile birlikte ortaya koymuştur. Kaynak prosesi açısından akım, kuvvet, kabartı yüksekliği ve sürenin fişkırtma ve çapaklanmayı en aza indirgeme noktasında etkin faktörler olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Kaynak kopma kuvveti yanıtı dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde ise kuvvet, akım, kabartı yüksekliği ve sac kalınlığı parametrelerinin söz konusu yanıt faktörü üzerinde etkin olduğu görülmüştür.

Çok amaçlı optimizasyon yöntemi ve doğrulama deneylerinde, 2843,93 N'luk kopma yükü ön şartı sağlanmış; bileşik endeks E değeri 5 ile 10 aralığında ölçülmüştür. Analizden tahmin edilen ve doğrulama deneyinde ölçülen E değerinin birbirine daha yakın olması ve doğrulama deneylerinde daha yüksek Fk değerleri sunması nedeniyle, çok amaçlı optimizasyon ile saptanan parametre seviye kombinasyonu optimal olarak kabul edilmiştir. Projeksiyon kaynağı için araştırılan 10 adet parametrenin ANOVA ile belirlenen yüzdesel katkı

sıralamasının, grafiksel yöntem ile veri ortalamaları üzerine etkiye dair belirlenen sıralama ile birebir örtüştüğü gözlenmiştir. Toplu gösterim Tablo 15'te belirtildiği gibidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Taguchi ve çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılmış; bu yöntemler neticesinde elde edilen bilgi ve bulgular doğrultusunda doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiş ve her iki yöntemin performansı kıyaslanmıştır. Daha sonra, performans değerlendirme sonuçlarına göre belirlenmiş parametrelerin etkenleri ve optimal değerleri tespit edilmiştir.

Proje kapsamında, cıvata kabartı boyutları olarak ele alınan üç parametrenin optimal ölçüleri $Lp = 9,48$ mm; $bp = 1,25$ mm ve $hp = 1,02$ mm olarak belirlenmiştir. Kaynak cıvatası kabartı yayı izdüşümünün uzunluğu (Lp) ile kabartı taban genişliğinin (bp) fişkırtma ve çapaklanma üzerine etkisinin çok düşük olduğu saptanırken; kabartı yüksekliğinin (hp) etkisinin beklenenden yüksek olduğu görülmüştür. Her ne kadar optimal bir Lp - bp - hp kombinasyonu elde edilmiş olsa da hp her iki yanıt faktörü üzerinde verimli bir kaynak prosesinde etkin bir faktör olarak bulunmuştur.

Yapılan çalışma, projeksiyon kaynak prosesinde sac ve cıvata üzerindeki çapaklanmayı en aza indirmeyi hedeflerken, kaynak kopma kuvvetini 2843,93 N üzerinde olmasını da ön koşul olarak almıştır. Ancak birden çok yanıt faktörü olan bu gibi sistemlerde hedeflerden yalnızca birinin değerlendirilmeye tabi tutulması ya da yanıt faktörlerinin birbirinden bağımsız olarak analiz edilmesi, doğrulanabilir ve gerçek temellere dayanan sonuçlar ortaya koymamıştır. Taguchi Yöntemi ile tespit edilen optimal faktörler neticesinde gerçekleştirilen deneylerde fişkırtma ve çapaklanma endeksi en alt seviyede hesaplanırken ($E < 5$), kaynak kopma yükü şartının ($< 2843,93$ N) sağlanmayacağı beklenen bir durumdur ve doğrulama deneyleri de bu kapsamda sonuçlar vermiştir. E yanıt faktörü en aza indirgenirken, kaynakta yeterli füzyon gerçekleşerek kaynak dayanım ön şartının sağlanması, eş zamanlı olarak analiz edilmesi gereken çoklu amaç fonksiyonuna sahip bir optimizasyon problemidir. Dolayısıyla, eş zamanlı analize imkan veren kompozit çekicilik fonksiyonuna dayalı çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılmış ve analiz sonucunda elde edilen optimal parametreler çerçevesinde gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde, numunelerde çapak gözlenmemiş, fişkırtma ve çapaklanma endeksi kabul edilebilir bir seviyede (< 10) ölçülmüştür. Kopma yükü için esas alınan 2843,93 N ön şart ise sağlanmıştır. Söz konusu optimal parametre seviye kombinasyonu Tablo 12'de verilmiştir. Projede tespit edilen optimal seviyeler yeterli akım ve elektrot kuvvetinde, uygun sac malzeme ve kalınlığında en

iyileştirilmiş cıvata formlarıyla verimli kaynak yapılmasına imkan sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Çalışmamızı, TÜBİTAK 1501 Programı çerçevesinde yürütülen 3130849 no'lu proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKÇA

1. Erhuy, C. G., Ateş, F., İnce, U., Biyık, A., Davut, K. 2015. "Projeksiyon Kaynağında Fişkırtma ve Çapaklanma Düzeyinin Tanımlanmasına Yönelik Sayısal Bir Göstergenin Geliştirilmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma," Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi, 20-21 Kasım 2015, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara.
2. Camıylmaz, E., Kutay, F. 2003. "Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım," Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, sayı 18 (3), s. 51-63.
3. Taguchi, G., Clausing, D. 1990. "Robust Quality," Harvard Business Review, January-February 1990, p. 65-76.
4. Ross, P. J. 1989. Taguchi Techniques for Quality Engineering, Mcgraw-Hil International Editions, Singapore.
5. Gökçe, B., Taşgetiren, S. 2009. "Kalite İçin Deney Tasarımı," Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, sayı 6 (1), s. 71-83.
6. Güral, G. 2003. "Gazaltı Kaynağında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi FBE, İzmir.
7. Lin, T. Y., Tseng, C. H. 2000. "Optimum Design For Artificial Neural Networks: An Example in a Bicycle Derailleur System," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 13, p. 3-14.
8. Hsieh, K., Tong, L. 2001. "Optimization Of Multiple Quality Responses Involving Qualitative and Quantitative Characteristics in IC Manufacturing Using Neural Networks," Computers in Industry, vol. 46, p. 1-12.
9. Taylan, D. "Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması, 2009, Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
10. Hamzaçebi, Ç., Kutay, F. 2003. "Taguchi Metodu: Bir Uygulama," Teknoloji, sayı 6 (3-4), p. 7-17.
11. Baynal, K. 2005. "Çok Yanıtlı Kalite Karakteristiklerinin Eşzamanlı En iyilenmesinde Taguchi Yöntemi ve Otomotiv Endüstrisinde Bir Uygulama," Endüstri Mühendisliği Dergisi, sayı 16 (2), s. 1-24.

12. Singh, N. K., Vijayakumar, Y. 2012. "Application of Taguchi Method for Optimization of Resistance Spot Welding of Austenitic Stainless Steel AISI 301L," Innovative Systems Design and Engineering, vol. 3 (10), p. 49-61.
13. Kuo, Y., Yang, T., Huang, G. W. 2008. "The Use of A Grey-Based Taguchi Method For Optimizing Multi-Response Simulation Problems," Engineering Optimization, vol. 40, p. 517-528.
14. Liao, H. C. 2003. "Using PCR-TOPSIS to Optimise Taguchi's Multi-Response Problem," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 22, p. 649-655.
15. Huang, J. T., Liao, Y. S. 2003. "Optimization of Machining Parameters of Wire-EDM Based on Grey Relational and Statistical Analyses," International Journal of Production Research, vol. 41, p. 1707-1720.
16. Biswas, S. A., Datta, S., Bhaumik, S., Majumdar, G. 2009. "Application of VIKOR Based Taguchi Method for Multi-Response Optimization: A Case Study in Submerged Arc Welding (SAW)," In Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, ICME 09-RT-35, 26-28 December 2009, Dhaka, Bangladesh.
17. Baynal, K. 2003. "Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile En İyilemesi ve Bir Uygulama," Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
18. Lin J., Lin, C. 2002. "The Use of The Orthogonal Array With Grey Relational Analysis to Optimize The Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, p. 237-244.
19. Jayaram, J., Ibrahim, Y. 1997. "Quality Note," Science, vol. 2, p. 199-205.
20. Yetilmezsoy, K. 2012. "Integration of Kinetic Modeling and Desirability Function Approach for Multi-Objective Optimization of UASB Reactor Treating Poultry Manure Wastewater," Bioresource Technology, vol. 118, p. 89-101.
21. Yetilmezsoy, K., Demirel, S., Vanderbei, R. J. 2012. "Response Surface Modeling of Pb(II) Removal from Aqueous Solution by Pistacia Vera L.: Box-Behnken Experimental Design," Journal of Hazardous Materials, vol. 171, p. 551-562.
22. Alpar, R. 2003. "Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş 1," Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
23. Tacq, J. J. 1997. "Multivariate Analysis Techniques In Social Science Research: From Problem to Analysis, Sage, London.

EK-1. Taguchi Yöntemiyle $L_{16}(2)^{10}$ Matrisine Göre Tasarlanan Deneylerde Yürütülen Projeksiyon Kaynak İşlemlerindeki Fişırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi ve Kaynak Kopma Kuşveti Değerleri ile Bunların Gruplardaki Standart Sapmaları

Deney No	DENEY TEKRAR NO. 1		DENEY TEKRAR NO. 2		DENEY TEKRAR NO. 3		DENEY TEKRAR NO. 4		DENEY TEKRAR NO. 5		STANDART SAPMALAR	
	Fişırma ve Çapaklanma Bileşik Endeksi (E)	Kaynak Kopma Yüğü (Fk [N])	Fişırma ve Çapaklanma Bileşik Endeksi (E)	Kaynak Kopma Yüğü (Fk [N])	Fişırma ve Çapaklanma Bileşik Endeksi (E)	Kaynak Kopma Yüğü (Fk [N])	Fişırma ve Çapaklanma Bileşik Endeksi (E)	Kaynak Kopma Yüğü (Fk [N])	Fişırma ve Çapaklanma Bileşik Endeksi (E)	Kaynak Kopma Yüğü (Fk [N])	E için Hesaplanan (σE)	Fk için Hesaplanan (σFk)
1	0,50	1647,52	4,10	3804,98	3,40	5491,72	10,00	5805,54	3,40	0,00	3,49	2500,70
2	12,56	6492,00	7,50	6237,03	6,20	5099,46	5,60	3961,89	5,70	6374,32	2,92	1088,54
3	9,20	3255,81	8,80	5275,98	12,20	2608,57	6,10	2687,02	10,21	4805,26	2,22	1235,64
4	11,60	13827,38	6,91	13788,15	16,44	14298,10	7,80	6354,71	10,40	13395,88	3,76	3353,87
5	9,00	0,00	2,40	0,00	3,80	0,00	4,10	0,00	4,30	0,00	2,51	0,00
6	3,20	0,00	4,50	0,00	2,90	0,00	3,90	0,00	0,90	0,00	1,37	0,00
7	1,60	3510,78	1,30	353,04	1,80	647,24	1,70	1412,16	3,30	1922,10	0,78	1245,44
8	0,50	3138,13	2,30	2137,85	2,70	764,92	1,50	274,59	1,80	568,79	0,84	1216,02
9	5,60	2981,22	5,80	10885,38	5,10	3589,23	4,90	3785,37	4,11	2353,60	0,66	3491,17
10	13,10	11944,50	14,40	9473,22	12,20	6629,30	12,01	11238,42	13,40	12336,77	0,97	2343,79
11	4,40	1588,68	3,50	686,47	2,20	1490,61	4,10	1667,13	3,50	4334,54	0,84	1392,54
12	9,20	7629,57	11,30	4648,35	9,41	4962,16	9,00	4314,93	12,30	6178,19	1,47	1363,12
13	17,41	13199,75	20,74	13709,70	23,40	15298,37	16,39	11728,75	24,80	0,00	3,65	6168,38
14	18,08	1882,88	26,69	8414,11	19,64	14611,91	19,91	8276,81	24,81	4981,78	3,71	4736,61
15	18,44	6040,90	13,11	4962,16	19,36	6256,64	19,36	7629,57	16,99	8100,29	2,61	1265,06
16	11,94	6295,87	11,81	7354,99	10,41	8021,84	11,10	6138,96	11,24	5687,86	0,61	961,05

EK-2. Taguchi Yöntemiyle $L_{16}(2)^{10}$ Matrisine Göre Tasarlanan Deneylerde Yürütülen Projeksiyon Kaynak İşlemlerinde Ölçülebilen Faktör Etkilerinin Grafiksel Gösterimi ve Varyans Analizi (ANOVA) Çalışmasında Kullanılan Fişırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi Değerleri ve Deney Gruplarındaki İstatistiksel Veriler

Deney No	PARAMETRELER											FIŞIRMA ve ÇAPAKLANMA (BİLEŞİK) ENDEKSİ, E			İSTATİSTİKSEL VERİLER		
	Akım (I [KA])	Kaynak Süresi (tç [Çevrim])	Elektrot Kuvveti (Fe [N])	Delik Çapı (Ds [mm])	Sac Kalınlığı (s [mm])	Sac Malzeme (DC 04: 0 DP 600: 1)	Cıvata Kiplenmesi (Kap.sız (Pn): 0 Zır-Ni Kap.lı: 1)	Kabartı Yayı İzdüşümü Uzunluğu (Lp [mm])	Kabartı Taban Genişliği (bp [mm])	Kabartı Yüksekliği (hp [mm])	DENEY TEKRAR (NO. 1)	DENEY TEKRAR (NO. 2)	DENEY TEKRAR (NO. 3)	Ortalama (E _{ort})	Standart Sapma (σ)	Sinyal/Gürültü Oranı (S/N [dB])	
1	14,1	2	6648,91	8,3	0,8	0	8,59	1,25	0,70	0,70	4,10	3,40	3,40	3,63	0,40	-11,24	
2	14,1	2	6648,91	8,3	0,8	0	9,48	1,82	1,02	1,02	6,20	5,60	5,70	5,83	0,32	-15,33	
3	14,1	2	6648,91	9,0	1,5	1	8,59	1,25	0,70	0,70	9,20	8,80	6,10	8,03	1,69	-18,22	
4	14,1	2	6648,91	9,0	1,5	1	9,48	1,82	1,02	1,02	6,91	7,80	10,40	8,37	1,81	-18,59	
5	14,1	4	10689,25	8,3	0,8	1	8,59	1,25	1,02	1,02	3,80	4,10	4,30	4,07	0,25	-12,2	
6	14,1	4	10689,25	8,3	0,8	1	9,48	1,82	0,70	0,70	3,20	2,90	3,90	3,33	0,51	-10,53	
7	14,1	4	10689,25	9,0	1,5	0	8,59	1,25	1,02	1,02	1,60	1,80	1,70	1,70	0,10	-4,619	
8	14,1	4	10689,25	9,0	1,5	0	9,48	1,82	0,70	0,70	2,30	2,70	1,80	2,27	0,45	-7,221	
9	19,8	2	10689,25	8,3	1,5	0	8,59	1,82	0,70	0,70	5,60	5,80	5,10	5,50	0,36	-14,82	
10	19,8	2	10689,25	8,3	1,5	0	9,48	1,25	1,02	1,02	13,10	12,20	12,01	12,44	0,58	-21,9	
11	19,8	2	10689,25	9,0	0,8	1	8,59	1,82	0,70	0,70	3,50	4,10	3,50	3,70	0,35	-11,39	
12	19,8	2	10689,25	9,0	0,8	1	9,48	1,25	1,02	1,02	9,20	9,41	9,00	9,20	0,21	-19,28	
13	19,8	4	6648,91	8,3	1,5	1	8,59	1,82	1,02	1,02	20,74	23,40	24,80	22,98	2,06	-27,25	
14	19,8	4	6648,91	8,3	1,5	1	9,48	1,25	0,70	0,70	18,08	19,64	19,91	19,21	0,99	-25,68	
15	19,8	4	6648,91	9,0	0,8	0	8,59	1,82	1,02	1,02	18,44	19,36	19,36	19,05	0,53	-25,6	
16	19,8	4	6648,91	9,0	0,8	0	9,48	1,25	0,70	0,70	11,94	11,81	11,24	11,66	0,37	-21,34	

EK 3. Taguchi Yöntemiyle $L_{16}(2)^{10}$ Matrisine Göre Tasarlanan Deneylerde Fişkırma ve Çapaklanma (Bileşik) Endeksi ile Kaynak Kopma Yükünün Kompozit Çekicilik Fonksiyonu Yaklaşımına Göre Çok Amaçlı Optimizasyonunda Kullanılan Veriler

Deney No	PARAMETRELER										FIŞKIRMA VE ÇAPAKLANMA BİLEŞİK ENDEKSİ (E)				KAYNAK KOPIMA YÜKÜ (Fk [N])			
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	D1	D2	D3	Y1	D'1	D'2	D'3	Y2
	I	tç	Fe	Ds	s	SM	CK	Lp	bp	hp	E	E	E	E _{ort}	Fk	Fk	Fk	F _{k-ort}
1	14,1	2	6648,91	8,3	0,8	0	0	8,59	1,25	0,70	4,10	3,40	-	3,75	3804,98	5491,72	-	4648,35
2	14,1	2	6648,91	8,3	0,8	0	0	9,48	1,82	1,02	6,20	5,60	5,70	5,83	5099,46	3961,89	6374,32	5148,49
3	14,1	2	6648,91	9,0	1,5	1	1	8,59	1,25	0,70	9,20	8,80	6,10	8,03	3255,81	5275,98	2687,02	3736,33
4	14,1	2	6648,91	9,0	1,5	1	1	9,48	1,82	1,02	6,91	10,40	-	8,66	13788,15	13395,88	-	13592,02
5	14,1	4	10689,25	8,3	0,8	1	1	8,59	1,25	1,02	3,80	4,10	4,30	4,07	0,00	0,00	0,00	0,00
6	14,1	4	10689,25	8,3	0,8	1	1	9,48	1,82	0,70	3,20	2,90	3,90	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00
7	14,1	4	10689,25	9,0	1,5	0	0	8,59	1,25	1,02	1,60	1,80	1,70	1,70	3510,78	647,24	1412,16	1853,46
8	14,1	4	10689,25	9,0	1,5	0	0	9,48	1,82	0,70	2,70	1,80	-	2,25	764,92	568,79	-	666,85
9	19,8	2	10689,25	8,3	1,5	0	1	8,59	1,82	0,70	5,60	5,10	-	5,35	2981,22	3589,23	-	3285,23
10	19,8	2	10689,25	8,3	1,5	0	1	9,48	1,25	1,02	13,10	12,01	-	12,56	11944,50	11238,42	-	11591,46
11	19,8	2	10689,25	9,0	0,8	1	0	8,59	1,82	0,70	3,50	4,10	-	3,80	686,47	1667,13	-	1176,80
12	19,8	2	10689,25	9,0	0,8	1	0	9,48	1,25	1,02	9,20	9,41	9,00	9,20	7629,57	4962,16	4314,93	5638,82
13	19,8	4	6648,91	8,3	1,5	1	0	8,59	1,82	1,02	20,74	23,40	-	22,07	13709,70	15298,37	-	14504,04
14	19,8	4	6648,91	8,3	1,5	1	0	9,48	1,25	0,70	19,64	19,91	-	19,78	14611,91	8276,81	-	11444,36
15	19,8	4	6648,91	9,0	0,8	0	1	8,59	1,82	1,02	18,44	19,36	19,36	19,05	6040,90	6256,64	7629,57	6639,10
16	19,8	4	6648,91	9,0	0,8	0	1	9,48	1,25	0,70	11,94	11,81	11,24	11,66	6295,87	7354,99	5687,86	6442,97

OFİS VE DERSLİKLERDE İÇ HAVA KALİTESİ ÖLÇÜMLERİ VE ANALİZLERİ: TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ ÖRNEĞİ

Anıl Sözen*

Anka Proje & Danışmanlık, İstanbul
anlsozen@gmail.com

Erdem Işık

Yrd. Doç. Dr.,
Tunceli Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Termodinamik Ana Bilim Dalı, Tunceli
erdem023@gmail.com

ÖZ

Günümüzde iç hava kalitesi kavramının önemi geçmiş yıllara kıyasla daha çok anlaşılmaktadır. İç hava kalitesi insan hayatının sağlık ve çalışma performansı üzerinde etkilidir. Kavramın iklimlendirme sistemleri ile doğrudan ilişkili olması, mekanik sistem çözümlenmeleri konusunda göz önüne alınması gereken önemli bir parametre olmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu çalışmada, Tunceli ilindeki yüksek öğretim kurumu derslikleri ve öğretim üyesi ofislerinde hava kalitesi ölçümleri yapılmıştır. İç hava kalitesi parametreleri olarak CO₂, bağıl nem ve sıcaklık değerleri göz önüne alınmıştır. Ölçümler Tunceli Üniversitesi Aktuluk yerleşkesinde iç ortamlar için yapılmıştır. Ölçüm sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiş ve standartlara göre değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İç hava kalitesi, sıcaklık, karbondioksit, nem, Tunceli Üniversitesi

INDOOR AIR QUALITY IN THE CLASSROOM AND OFFICE AND RELATED MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF RESULTS: TUNCELİ UNIVERSITY EXAMPLE

ABSTRACT

Today, the importance of the Indoor Air Quality concept is understood more as compared to the past years. The Indoor Air Quality affects human life positively or negatively in terms of health and working performance. The concept is directly related to the air conditioning systems, so it's inevitable that it affects mechanical system analysis. In this study, measurements have been made in the classrooms of the higher education institution in the province of Tunceli, and in the faculty offices. CO₂, relative humidity and temperature values have been taken as indoor air quality parameters. The measurements have been taken for indoor places in the Aktuluk Campus of Tunceli University. The measurement results have been analyzed statistically and evaluated according to the standards.

Keywords: Indoor air quality, temperature, carbon dioxide, moisture, Tunceli University

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 12.12.2015

Kabul tarihi : 16.05.2016

Sözen, A., Işık, E. 2016. "Ofis ve Dersliklerde İç Hava Kalitesi Ölçümleri ve Analizleri: Tunceli Üniversitesi Örneği," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 677, s. 53-67.

1. GİRİŞ

Yaşadığımız dünyada atmosferden soluduğumuz hava temiz değildir. İçinde polenler, bakteriler, çeşitli canlı ve ölü mikroorganizmalar, tozlar, buharlaşma sonucu oluşan su zerrecikleri, endüstriden kaynaklı kimyasal reaksiyonlar neticesi oluşan veya üretim işlemleri neticesi ortaya çıkan tanecikler bulunmaktadır. Bunların tamamı soluduğumuz havayı kirletici özelliktedir.

Aynı şekilde, kapalı mahallerde de solunan hava temiz değildir. Yukarıda belirtilen kirleticilerin bir bölümü sızma sonucu içeriye girmektedir. Ayrıca, içeride bulunan insanlardan ve eşyalardan da dışarıya kirleticiler yayılmaktadır. İnsanlar üzerinden, deri ve giysilerinden, kullanılan parfümden kalan tanecikler, nefes alıp vermekte ortaya çıkan emisyonlar büyük boyutlardadır. Örneğin normal hareket eden bir insan dakikada 1.000.000'un üzerinde (0.3 µm'den büyük) tanecik yaymaktadır (Tablo 1). Bunun en az 1000 adedi çoğalabilen bakteriler ve mikroorganizmalardır. Temizlik kurallarına uyularak ve özel elbiseler giyilerek bu tanecikleri ve emisyonları azaltmak mümkündür, ancak hiçbir zaman tamamen yok edilemez [1].

Tablo 1. İnsanlardan Kaynaklı Tanecik Emisyonu [1]

İnsanın Yaptığı Hareket Türü	Tanecik Emisyonu/ Dakika d>0.3µm
Ayakta veya oturarak hareketsiz durma	100 000
Oturarak baş, el ve kolu hafifçe oynatma	500 000
Oturarak vücudu, kolu ve ayakları oynatma	1 000 000
Ayakta ve vücut tam hareketli	2 000 000
Saatte 3.5 km hızla yürüme	5 000 000
Saatte 6 km hızla yürüme	7 500 000
Saatte 9 km hızla yürüme	10 000 000
Spor veya jimnastik yapma	15 ila 30 000 000

Temiz hava konusunda, odanın kullanım amacına göre istenmeyen zararlı taneciklerin boyutları ve cinsi farklıdır. Örneğin sağlık açısından önemli olan bir ortamda, hastanelerde, ameliyathanelerde, ilaç fabrikalarında, biyokimya laboratuvarlarında öncelikle, havada bulunan bakteri ve virüslerin temizlenmesi, mahaller arasında mikrop taşınmasının engellenmesi sağlanmalıdır.

Elektronik endüstrisinde ise durum farklıdır. Burada taneciklerin biyolojik etkisi değil, fiziksel etkisi önemlidir. Teknolojinin ilerlemesiyle entegre devrelerde hat genişlikleri her gün biraz daha küçülmektedir. Genel kural olarak hat genişliğinin onda biri veya daha büyük çaptaki tanecikler devre için öldü-

rücü olmaktadır. Entegre devreler için 1970'li yıllarda 0.5 µm tanecikler zararlı olurken, 1990'lı yıllarda 0.02 µm çapındaki tanecikler devreler için zararlı olmaya başlamıştır [1]. Eğitim kurumlarında ise derslikler kullanımı yoğun alanlardır ve içerisinde bulunan insanların yaptığı hareket türü bakımından yaydığı tanecik emisyonu dakikada ortalama 1.000.000 kadardır. Bu değer derslikteki kişi sayısı arttıkça yoğunlaşacak ve derslikteki eğitim-öğretim verimsiz olmaya başlayacaktır. Bu gibi durumları önlemek amacıyla, doğal havalandırmanın yerine eğitim kurumlarına mekanik havalandırma yapılması önerilmektedir.

2. TEMİZ ODA TASARIMINDA DİKKATE ALINACAK PARAMETRELER

Temiz oda tasarımında dikkate alınacak parametrelerin başında ortamda bulunan maksimum tanecik konsantrasyonu ve çapı gelir. Bunun dışında sıcaklık, nem, basınç, ses şiddeti ve benzeri parametreleri kontrol altında tutmak gerekir [1].

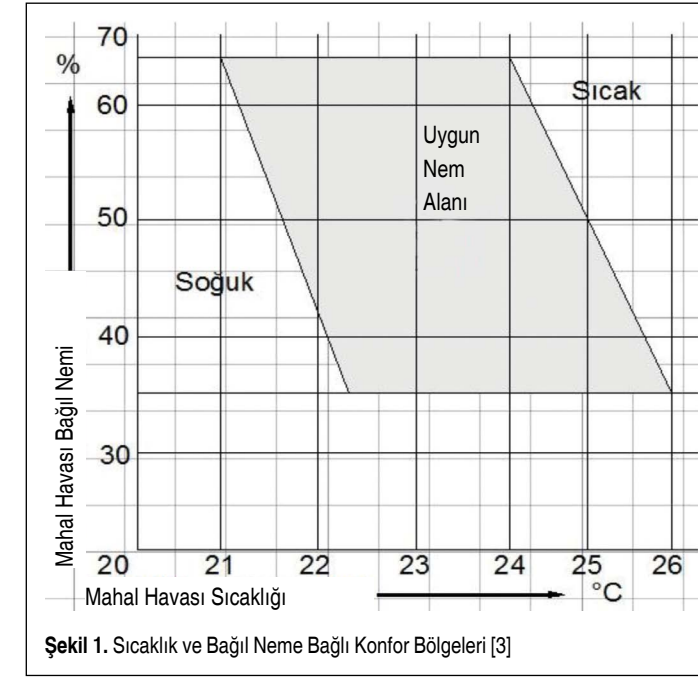
İnsanlardan ve diğer kirleticilerden kaynaklanan CO₂ miktarları iç hava kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. ASHRAE 55'e göre [3] mahaldeki kirlilik dış havadan 400 ppm kadar fazla olabilir. Sağlığa uygun kabul edilebilir dış hava kirlilik değerleri ise 600 ppm'e kadardır. Buna göre, iç mahallerdeki CO₂ değerleri en fazla 900-1000 ppm civarında olmalıdır.

2.1 Sıcaklık

Sıcaklığı kontrol etmekte iki amaç vardır. Birincisi, içeride çalışan insanların konforunu korumak, yani üşümelerini veya terlemelerini sağlamaktır. İkincisi ise ameliyathane ve laboratuvarlarda, elektronik sanayide birçok işlem sıcaklığa aşırı duyarlıdır. Örneğin ameliyathanelerde kan pıhtılaşması, biyokimya laboratuvarlarında bakteriler ile yapılan testler belirli sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Hayvan laboratuvarlarında hayvanları yaşatma ve üretme için belli sıcaklıklar gerekmektedir. Elektronik sanayide metallerin sıcaklık farklılıklarından dolayı ortaya çıkan genleşme, metal ölçüm ve kalibrasyon laboratuvarlarında metallerin genleşmesinden dolayı oluşabilecek ölçüm hataları sıcaklığın kontrol altına alınmasını gerektirmektedir [1].

2.2 Bağıl Nem

Bağıl nemi kontrol etmede iki amaç vardır. Birincisi, gerekli konfor şartlarını sağlamaktır. İkincisi ise proses gereğidir. Düşük bağıl nemli ortamlarda insanların ağır ve boğazları kurur. ABD ASHRAE standartlarına göre, ideal şartlar için sıcaklığın 20-25,5 °C, nemin ise %30-60 arasında olması gerekmektedir. Bu değerlerin dışındaki ortam havası çalışanların iş üzerindeki konsantrasyonunu azaltabilmektedir. Yüksek



Şekil 1. Sıcaklık ve Bağıl Neme Bağlı Konfor Bölgeleri [3]

bağıl nemli ortamlarda ise metabolik dengeyi sağlamak için deriden olan terleme azalacağından yine çalışma düzeni etkilenecektir [1].

Yine ortamdaki bağıl nemin etkilediği diğer bir fiziksel özellik de statik elektriktir. Bu da elektronik cihazların çalışması üzerinde etkili olur. Ayrıca "microchip" imalatına da etkisi olabilmektedir. Bu nedenle, bağıl nem belirli seviyelerde tutulması istenir [1].

Eğer özel bir kriter yoksa, temiz odada seçilen sıcaklık değerleri 22°C (20-24°C) ve bağıl nem %45 (%40-55) olmalıdır (Şekil 1). Genel amaçla kullanılan odalarda sıcaklığın ±1°C, nemin ise ±%5 toleransla tutulmasına çalışılır. Eğer odalarda herhangi bir nedenle hassasiyet gerektiriyorsa bu toleranslar ±0.3°C ve ±%2 ye kadar düşürülebilir [1].

2.3 Hava Hızı ve Basınçlandırma

Temiz odalarda oda basıncı ve oda içindeki hava hızının da kontrol altında tutulması istenir. Oda pozitif basınç altında tutularak sızma yoluyla pencere veya kapı gibi yerlerden mahal içerisine kirli veya tozlu havanın girmesi engellenir. Bu işlemi üfleme ve dönüş havası arasında debi farkları yaratarak gerçekleştirmek mümkündür. Bu sayede, odadan emilen hava debisi üflenenden daha düşük olacağı için o hacimde pozitif bir basınç yaratılmış olacaktır. Hassas sistemlerde bu özellik bir fark basınç presostatı ile kontrol

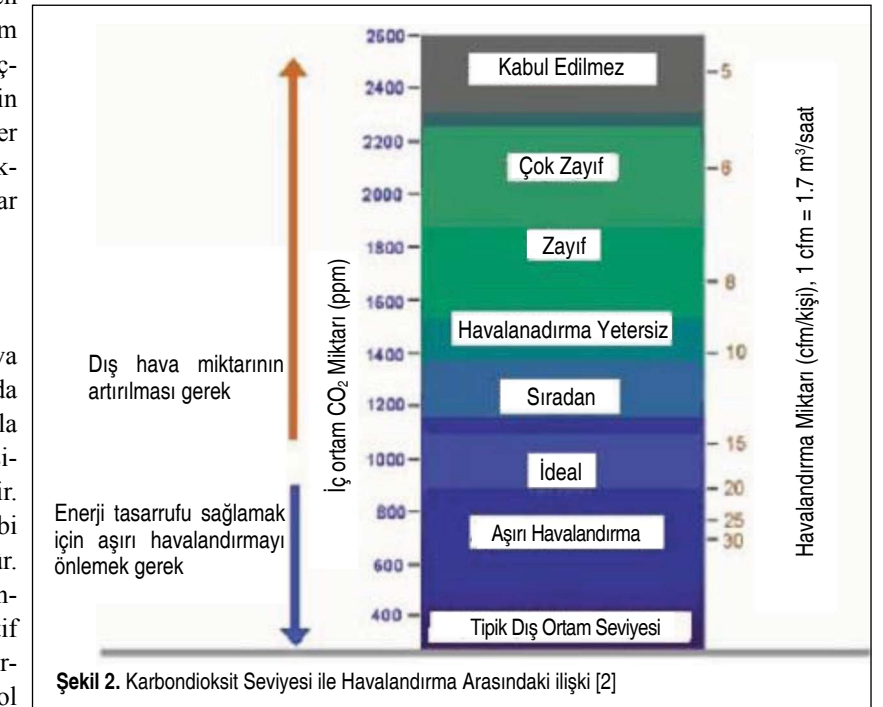
edilebilir. Mahalde, örneğin bir kapı açılması nedeniyle pozitif basınç farkının azalması ve buna bağlı olarak infiltrasyon tehlikesi durumunda presostat bunu algılayacak ve üfleme basıncını artırıcı sistemleri devreye sokacaktır. Bu uygulama için kullanılan presostatlar genelde oransal karakteristiktir. Presostat mahaldeki basınç düşümünü algılayarak gerekli işlemlerin yapılmasını sağlar. Bu işlem, kanal üzerinde bulunabilecek bir damperin daha fazla açılarak, özel bir basınçlandırma fanını devreye sokması suretiyle gerçekleştirilir. Bu sistem, değişken hava debili (VAV) olup, pozitif basınç farkı değişen hava debisi ile sağlanır. Hava debisinin değişmesi fan girişindeki hareketli kanatçıklara (inlet guide vanes), oransal kontrollü frekans değiştiriciler aracılığıyla fanın elektrik motoruna kumanda ederek veya fanla birlikte değişken hava debisi kutularının kontrolü ile sağlanır [1].

Bu nedenle, oda içerisine üflenen ve emilen havanın mümkün olduğu kadar az değiştirilmesini sağlamak gerekir. Sistemde bulunan filtrelerin kirlenmesi ile odaya daha az hava üflenmesi pozitif basınçlandırmayı engellemeye çalışacağı için filtrelerin ömürleri ve kirlilikleri belirli aralıklarla kontrol edilmelidir [1].

2.4 CO₂ Miktarı

CO₂ iç hava kalitesini kontrol etmek için önemli bir iç hava kirleticisidir. Normalde atmosfer havasının hacimsel olarak %0.03'ü CO₂'dir. Dış ortam havasında bulunan CO₂, çevre özelliklerine göre 330 ile 500 ppm arasındadır. Dolayısıyla, iç ortamda CO₂'in olmaması mümkün değildir.

İnsanlar nefes alıp vererek iç ortama CO₂ verirler. Normal bir



Şekil 2. Karbondioksit Seviyesi ile Havalandırma Arasındaki İlişki [2]

iş ile uğraşan bir insan saatte 20 litre (0.02 m³/h) CO₂ üretir [2]. Bu yüzden, iç ortamda havalandırma yapılmazsa, insan sayısı arttıkça CO₂ derişimi artar. 1000 ppm CO₂ konsantrasyonu iç hava kalitesi için standart değer olarak kabul edilmektedir [2, 3]. Eğer CO₂ miktarı bu seviyeden düşük ise iç ortamdaki hava, kabul edilebilir iç hava kalitesindedir. 1000 ppm CO₂ miktarı, Pettenkofer sayısı olarak da bilinmektedir [2]. Kabul edilebilir iç hava kalitesi oluşturmak için CO₂ algılayıcıları havalandırma sistemleri ile kullanılarak, gerekli olan temiz dış hava iç ortama sevk edilmektedir.

CO₂ zehirli bir gaz değildir; fakat oksijensizlikten dolayı boğulma tehlikesi ortaya çıkarabilir. Konsantrasyon değeri 35000 ppm'i geçtiğinde, merkezi nefes sinir alıcıları tetiklenir ve nefes alma noksanlığına sebep olur. Daha yüksek konsantrasyonlarda oksijen azlığından dolayı merkezi sinir sistemi görevini yapamamaya başlar. Ofis binaları ve okullar gibi endüstriyel olmayan çevrelerde CO₂ konsantrasyonunun insan yoğunluğu, havanın dağıtılma şekline ve oturulan ortama dışarıdan sağlanan dış hava miktarına bağlı olarak 400 ile 1500 ppm arasında olması beklenir [4]. Şekil 2'de, kapalı mahallerde CO₂ ile havalandırma arasındaki ilişki görülmektedir.

3. HAVA KİRLİTİCİLERİN SAĞLIK ÜZERİNDE OLUMSUZ ETKİLERİ

Dünyada hava kirliliğinden her yıl yaklaşık 3 milyon insan ölmektedir. Bu değer, dünyadaki toplam ölüm vakalarının (ortalama 55 milyon) %5'ni oluşturmaktadır.

Hava kirliliğinin sağlık üzerindeki olumsuz etkileri şunlardır:

- Akciğer kanseri
- Kronik astım krizi
- Öksürük/balgam/göğüs daralması şikayetleri
- Göz/burun/boğaz tahribatı
- Soluk alma kapasitesinde azalma

Uçucu organik bileşiklerden (VOC) benzen, toluen, formaldehit ve kloroform USEPA tarafından kanserojen olarak tanımlanmıştır [USEPA, 2011]. Bunun dışındaki diğer gazlar toksin etkiye sahiptir. Uçucu organik bileşiklerden benzen, başta Amerikan İnsan Sağlığı Servisi (DHHS) ve diğer Çevre ve İnsan Sağlığı Araştırma Merkezleri tarafından birinci sınıf kanserojen olarak nitelendirilmiştir. 1µg/m³ benzen sürekli maruz kalma durumunda kan kanseri riski 2.2 x 10⁻⁶-7.8 x 10⁻⁶ civarında seyretmektedir [EPA, 2002]. Bu durum da 1.3-4.5 µg/m³ dozundaki benzen sürekli soluyan bir insanın yüz binde bir olasılıkla kansere yakalanması anlamına gelmektedir. Kısa süreli yüksek dozdaki benzen maruziyeti ölüme neden olurken; düşük seviyeli maruziyet ise uyuşukluk, baş dönmesi, kalp ritminde bozukluğa sebep olabilmektedir. Kanserojen etkisinden dolayı benzen, endüstride kullanımı yasaklı bir kimyasaldır. Benzen üretiminde toluenin kaynak olabileceği ve her ikisi de laboratuvar araştırmalarında solvent olarak kullanıldığı için son zamanlarda toluen solvent olarak benzenle ikame etmektedir. Diğer bir uçucu organik bileşik olan formaldehitin sağlık üzerindeki olumsuz etkileri; göz, burun ve boğaz tahrişleri, öksürük, bitkinlik, isilik, alerjik hastalıklar gibi sayılabilirken, formaldehitin kanser oluşumuna da yol açtığı gözlenmektedir. Diğer bir etkisi de

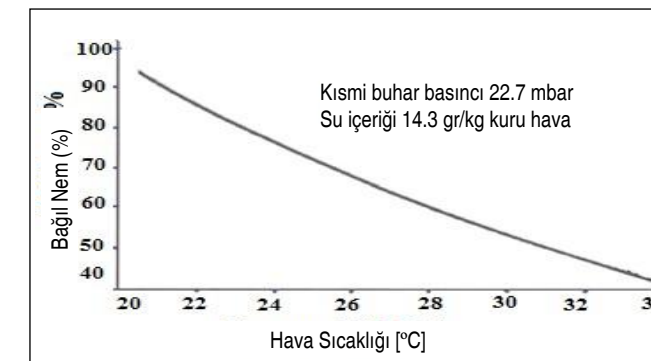
merkezi sinir sistemi üzerinedir. Kısa süreli bellek kayıpları ve anksiyeteye (kaygı, korku, gerilim, sıkıntı hali) neden olabilir. Sağlık üzerine olumsuz etkileri 0,1 ppm - 1,1 ppm düzeylerinde ortaya çıkan formaldehit, olası mesleki kanser nedenleri arasında sayılmaktadır [11].

3.1 İç Hava Kalitesi ile İlgili Standartlarda Önerilen Sınır Değerler

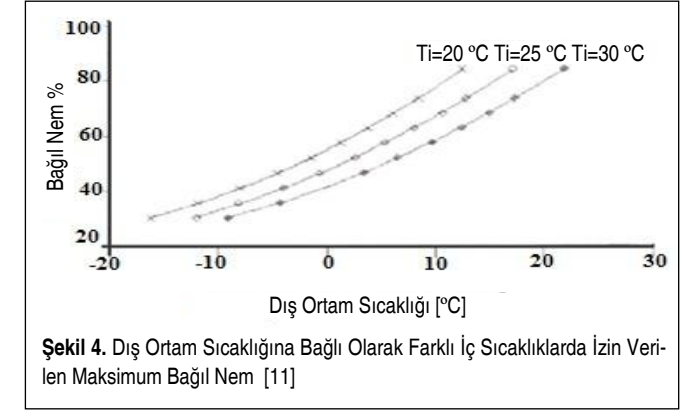
Dünyanın birçok ülkesinde, iç hava kalitesi ile ilgili kirleticilerin maksimum sınırlarını belirleyen standartlar mevcuttur. Bu standartlar sürekli güncellenmektedir. Tablo 2'de, iç ortam ile ilgili değişik ülkelerin standartlarında iç hava kalitesi parametrelerine ait sınır değerler verilmiştir [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Tablodan görüldüğü gibi, iç hava kalitesi parametrelerinde önerilen sınır değerler ülkeden ülkeye farklılıklar gösterebilmektedir.

4. KAPALI MAHALERDE TEKNİK OLARAK KONFORUN SAĞLANMASI

ASHRAE'nin 1999 yılında çıkardığı "kabul edilebilir iç hava kalitesi için havalandırma sistemi" adlı en son standardında iç hava kalitesi tanımı şu şekilde yapılmaktadır. Mevcut yasalara göre içinde zararlı madde oranı azami değerleri aşmamış kirletici maddeleri ihtiva eden ve bu havayı soluyan insanların en az %80'inin memnuniyetsizlik hissetmedikleri hava kalitesidir. Hijyen ve sağlık açısından, içinde insan bulunan odaların hangi sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde olması gerektiği standartlarda verilmiştir. Düşük hava sıcaklıkları insanlarda rahatsızlığa neden olmaktadır. Ofisler ve çalışma salonlarındaki bağıl nem miktarı maksimum %53, minimum %42 dolayındadır. Kapalı ortamlardaki metal ve ahşap yapı bileşenlerinin herhangi bir zarara uğramaması için bağıl nem %40 ile %60 arasında bir bölgede bulunmalıdır. Şekil 3 ve Şekil 4'te, dış ve iç ortam sıcaklığına bağlı olarak izin verilen maksimum bağıl nem değerleri verilmektedir [11].



Şekil 3. VDI 2089 Sayfa 1'e Göre Çıplak İnsan İçin Bunaltıcı Sınır [11]



Şekil 4. Dış Ortam Sıcaklığına Bağlı Olarak Farklı İç Sıcaklıklarda İzin Verilen Maksimum Bağıl Nem [11]

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Materyaller

Bu çalışmada, Tunceli ilinde bulunan Tunceli Üniversitesi'nin öğretim üyeleri ofislerinde ve dersliklerde iç hava kalitesi ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sonucunda CO₂, nem ve sıcaklık parametreleri ile ilgili veriler elde edilmiştir.

5.1.1 Ölçümde Kullanılan Cihazlar

CO₂, Sıcaklık ve Bağıl Nem İçin Kullanılan Cihazlar (El Tipi Testo 435 Cihazı)

Yapılan çalışmada, ölçümler için sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ ölçüm cihazları kullanılmıştır. Veri kaydedici özelliği olan el tipi, sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ cihazı Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu ölçümlerde el tipi testo 435 cihazı kullanılmıştır. Cihaz, mahalin merkez noktası baz alınarak konuşlandırılmış ve ölçümlerdeki konum değişimi bu referansa göre göz önüne alınmıştır.



Şekil 5. Testo 435 Tipi El Cihazı

Tablo 2. İç Hava Kalitesi ile İlgili Standartlarda Önerilen Sınır Değerler [5, 6, 7, 8, 9, 10]

	CO	Partikül Madde	Bağıl Nem	Sıcaklık
ABD ASHRAE	1000 ppm	PM10<75 µg/m ³ (Yıllık Ortalama)	%30-60	20-25,5 °C
Almanya	5000 ppm 9000 ppm (15 Dakika)		%30-70	20-26 °C
Kanada	3500 ppm	PM10<40 µg/m ³ (8 Saat) PM10<100 µg/m ³ (1 Saat)	%30-80 (Yaz) %30-55 (Kış)	
Çin		PM10<150 µg/m ³		
WHO		PM10<20 µg/m ³ (Yıllık Ortalama) PM10<50 µg/m ³ (24 Saat)		
İngiltere		PM10<50 µg/m ³		
Norveç		PM2.5<20 µg/m ³		
Avrupa Birliği		PM2.5<35 µg/m ³		
Hong Kong	800 ppm (1. Düzey) 1000 ppm (2. Düzey)	PM10<20 µg/m ³ (1. Düzey) PM10<180 µg/m ³ (2. Düzey) (8 Saat Ortalama)	%40-70	20-25,5 °C

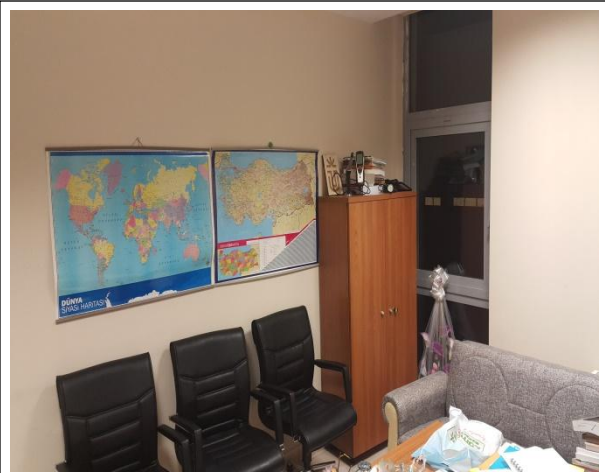
Tablo 3. Ofislerin Yapısal Özellikleri

OFİS	En (cm)	Boy (cm)
Penceresiz Yan Duvar (Saten Boya-1.5 cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5 cm Sıva-Saten Boya)	467,1	261
Penceresiz Yan Duvar-Karşı (Saten Boya-1.5 cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5 cm Sıva-Saten Boya)	467,1	261
Pencereli Duvar Pencere (Profiller Dahil)	331,4 99	261 201
Penceresiz Duvar-Giriş (Saten Boya-1.5 cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5 cm Sıva-Saten Boya)	331,4	261
Döşeme (20 cm Döşeme Beton-1,5 cm Yapıştırıcı Harç-8 mm-Seramik-Zemin Kaplama)	467,1	331,4
Tavan (20 cm Döşeme Beton-1,5 cm Yapıştırıcı Harç-8 mm-Seramik-Zemin Kaplama)	467,1	331,4
Kapı (Amerikan Kapı)	90	210

Ofislerin Kullanım Yoğunlukları ve Resimleri

- Kullanılan Ekipmanlar: 2 adet bilgisayar (1 adet laptop – 1 adet masaüstü olmak üzere)

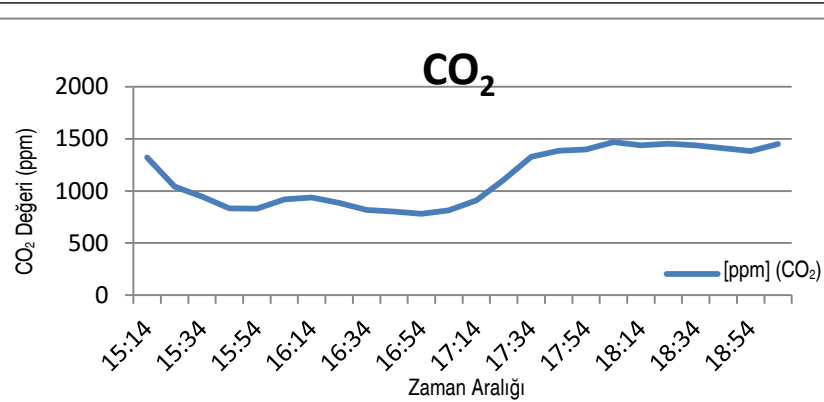
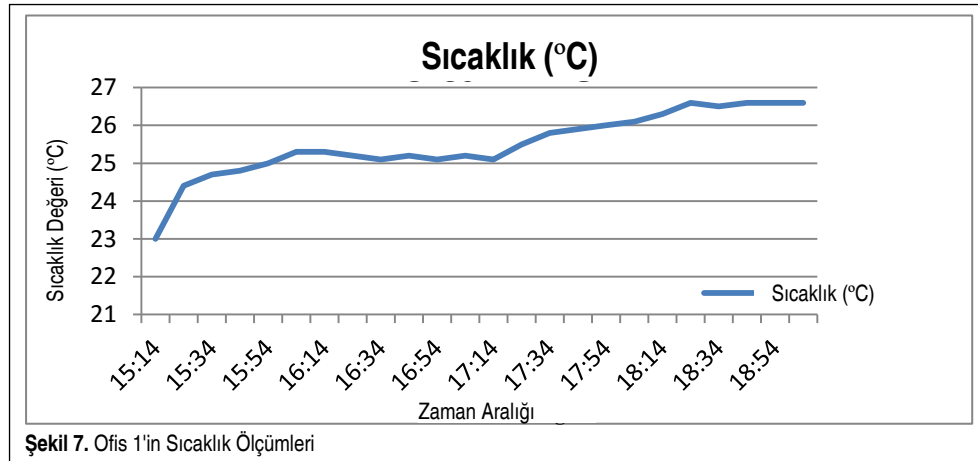
- Ofisteki Kişi Sayısı: Maksimum 5 kişi (Hoca ve ziyaret eden öğrenciler); ancak ölçüm sırasında maksimum 3 kişi
- Şekil 6-8'deki grafiklerde de görüldüğü gibi, CO₂ oranı mini-



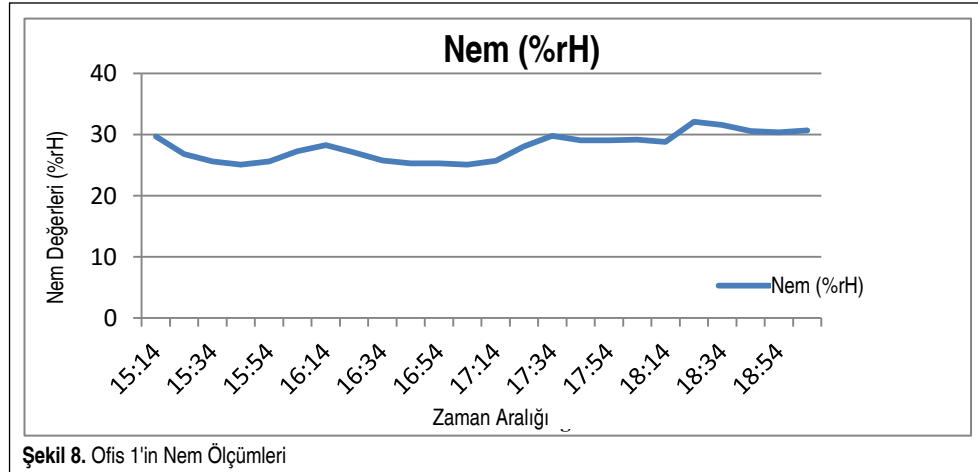
Resim 1. Ofisin Görünümü



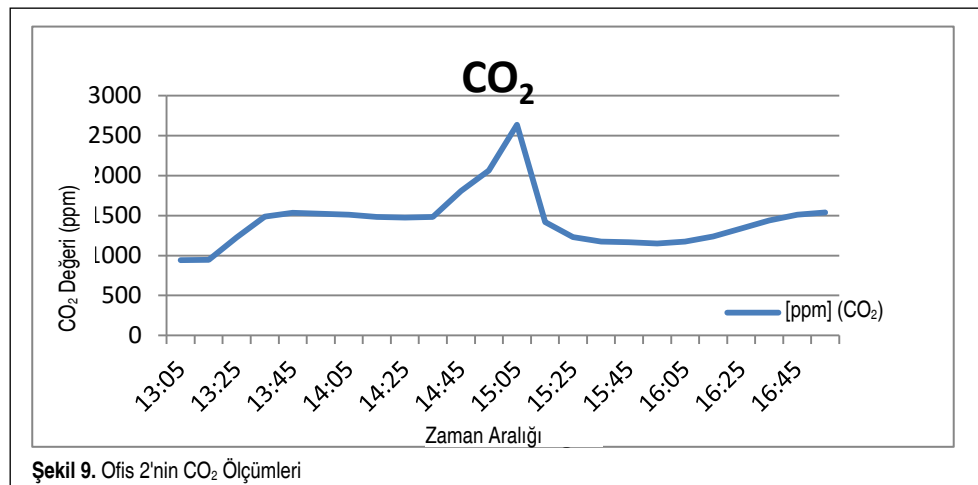
Resim 2. Ofisin Görünümü

Şekil 6. Ofis 1'in CO₂ Ölçümleri

Şekil 7. Ofis 1'in Sıcaklık Ölçümleri

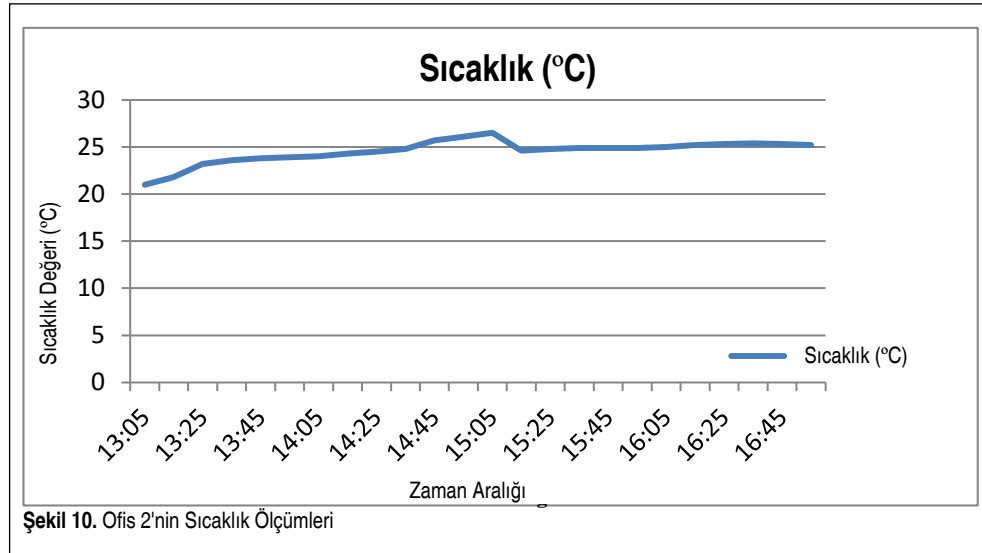


Şekil 8. Ofis 1'in Nem Ölçümleri

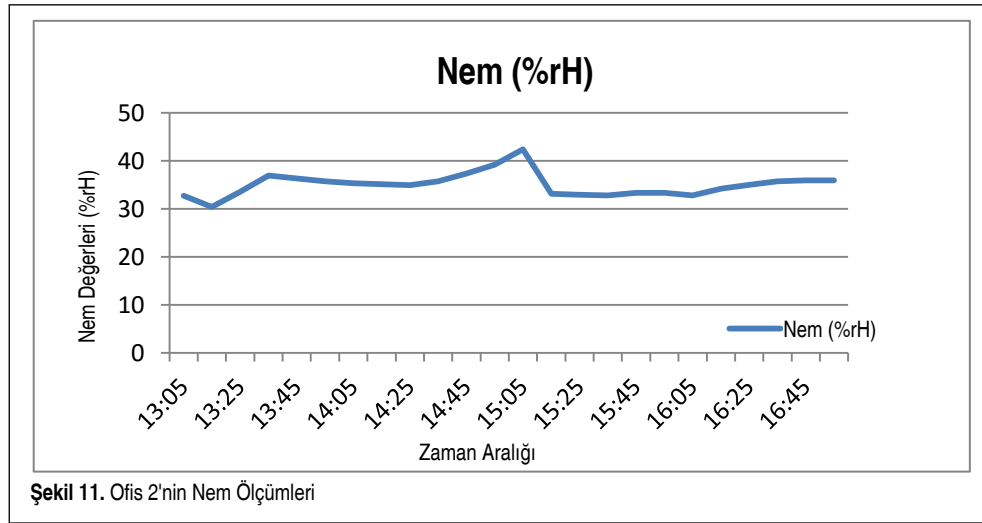
Şekil 9. Ofis 2'nin CO₂ Ölçümleri

mum ve maksimum değerleri 780 - 1468 ppm, ortalama değeri ise 1129.16 ppm olarak görülmektedir. Standart değerlere göre CO₂ oranı ideal havaya sahip olmakla birlikte, ASHRAE standartlarına uygundur.

Nem oranı olarak görülen minimum ve maksimum değerler 23 – 26.6 %rH, ortalama değeri ise 25.49 %rH olarak okunmaktadır. Bu değerler Şekil 2 göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, uygun nem alanından daha düşük nem oranına sahiptir. Ayrıca Şekil 7'de görüldüğü gibi, sıcaklık değerleri



Şekil 10. Ofis 2'nin Sıcaklık Ölçümleri



Şekil 11. Ofis 2'nin Nem Ölçümleri

23 ila 26.6 °C arasında değişmekte olup, ortalama 25.49 °C standartlar arasında yer almaktadır.

Grafiklerde görüldüğü gibi, CO₂ oranı minimum ve maksimum değerleri 943 - 2638 ppm, ortalama değeri ise 1437.33 ppm olarak görülmektedir. Bu sonuç, CO₂ oranının standart değerlerin üzerinde olduğunu ve temiz dış hava miktarının artırılması gerektiğini göstermektedir.

Nem oranı olarak görülen minimum ve maksimum değerler 30.4 – 42.4 %rH, ortalama değeri ise 35.01 %rH olarak okunmaktadır. Bu değerler Şekil 2 göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, uygun nem alanına sahip ortam olarak değerlendirilebilir. Ayrıca Şekil 13'te görüldüğü gibi, sıcaklık değerleri 21 ila 26.5 °C arasında değişmekte olup, ortalama 24.52 °C standartlar arasında yer almaktadır.

Dersliklerin Kullanım Yoğunlukları ve Resimleri

- Kullanılan ekipmanlar: Hocanın bilgisayarı ve projeksiyon cihazıyla birlikte 2 adettir.

- Derslikteki Kişi Sayısı: 66 kişilik kapasiteye sahip sınıflarda, ölçüm yapılan sıradaki kişi yoğunluğu derse giren çıkan kişiler dahilinde 26 kişi

Grafiklerde görüldüğü gibi, CO₂ oranı minimum ve maksimum değerleri 454 - 1094 ppm, ortalama değeri ise 674.08 ppm olarak görülmektedir. Standart değerlere göre, CO₂ oranı aşırı havalandırma seviyesi olmakla birlikte, yeterli miktarda havalandırma yapıldığı görülmektedir. Enerji tasarrufu açısından havalandırma azaltılabilir.

Nem oranı olarak görülen minimum ve maksimum değerler %22.5-29.8 rH, ortalama değeri ise %25.47 rH olarak okunmaktadır. Bu değerler Şekil 2 göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, uygun nem alanından daha düşük nem oranına sahiptir. Ayrıca Şekil 14'te görüldüğü gibi, sıcaklık değerleri 22.4 ila 27 °C arasında değişmekte olup, ortalama 26.24°C ile standartların üstünde bir sıcaklığa sahiptir.

Grafiklerde görüldüğü gibi, CO₂ oranı minimum ve maksimum

Tablo 4. Dersliklerin Yapısal Özellikleri

Derslikler	En (cm)	Boy (cm)
Penceresiz Yan Duvar-Giriş (Saten Boya-1.5cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5cm sıva-Saten Boya)	1366	261
Pencereli Duvar	1366	261
1. Cam	193	201
2. Cam	193	201
3. Cam	193	201
4. Cam	193	201
5. Cam	193	201
6. Cam	193	201
Penceresi Olmayan Bölmeler (Saten Boya-1.5cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5 cm Sıva-Saten Boya)	1366	261
Tahtanın Bulunduğu Duvar (Saten Boya-1.5 cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5 cm Sıva-Saten Boya)	669,5	261
Tahtanın Karşısı (Saten Boya-1.5 cm Sıva-12'lik Tuğla-1.5 cm Sıva-Saten Boya)	669,5	261
Döşeme (20 cm Döşeme Beton-1,5 cm Yapıştırıcı Harç-8 mm-Seramik-Zemin Kaplama)	669,5	261
Tavan: H= (20 cm Döşeme-15 cm Tesizat Boşluğu-1,5 cm Karolaj)	669,5	261
En= (192,3 cm Alçıpan-437,9 Kompozit Malzeme-39,3 cm)	669,5	261
Kapı (Amerikan Kapı)	90	210



Resim 3. Dersliklerin Görünümü

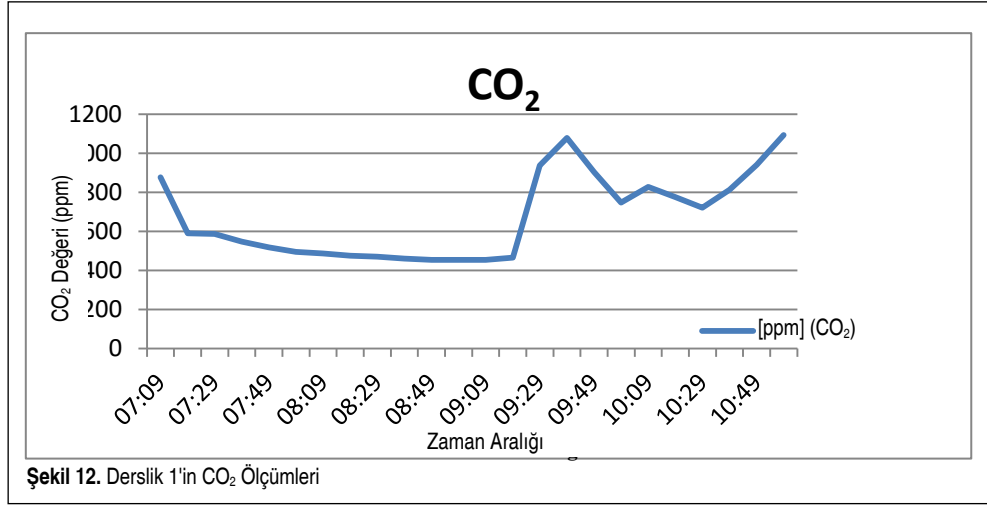
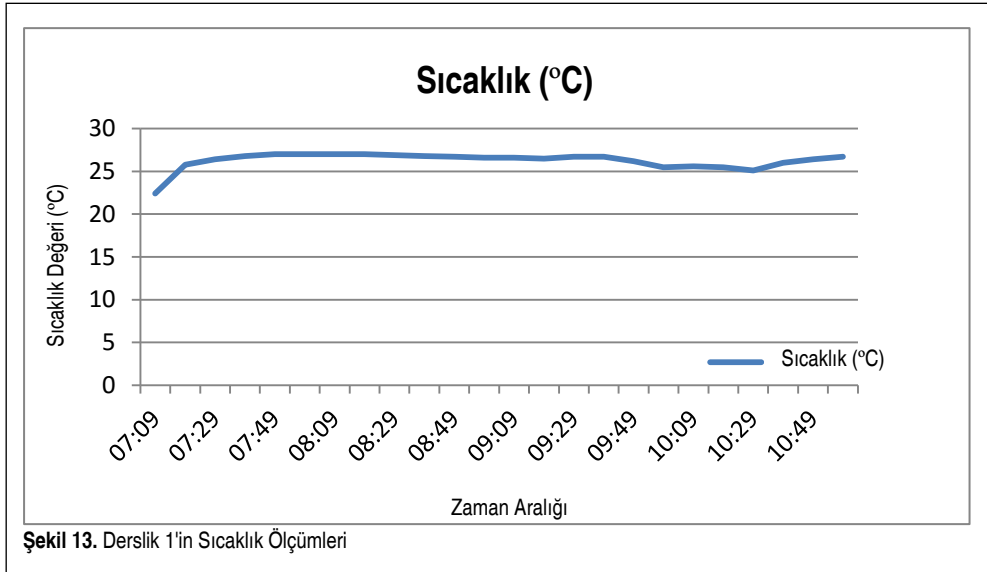


Resim 4. Dersliklerin Görünümü

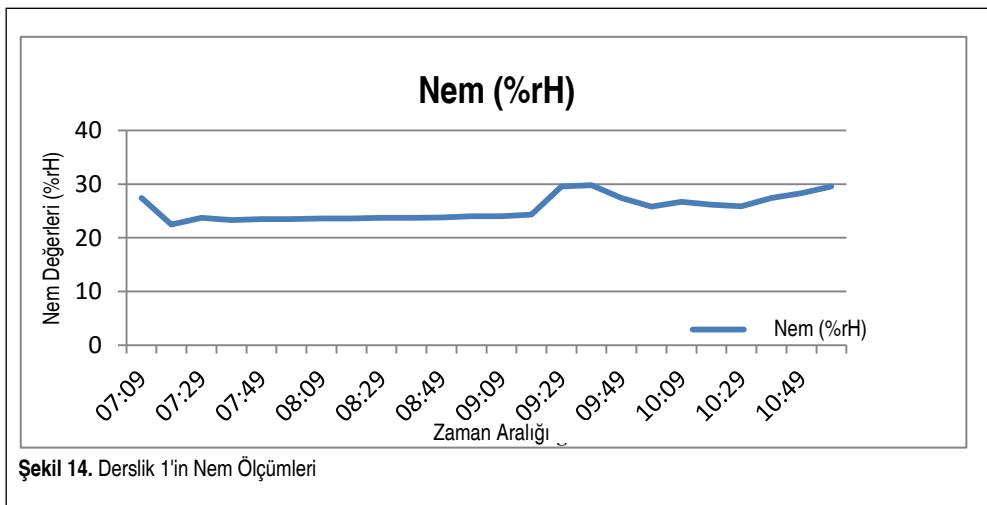
mum değerleri 744 - 2247 ppm, ortalama değeri ise 1223.958 ppm olarak görülmektedir. Standart değerlere göre, CO₂ oranının normalin üstünde olduğu ve dış hava miktarının artırılması gerektiği görülmektedir.

Nem oranı olarak görülen minimum ve maksimum değerler %43-54.7 rH, ortalama değeri ise %50.43 rH olarak okunmaktadır. Bu değerler Şekil 2 göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, uygun nem alanına sahip ortam olarak değerlendirilebilir. Ayrıca Şekil 16'da görüldüğü gibi, sıcaklık değerleri 20.6 ila 23 °C arasında değişmekte olup, ortalama 21.59 °C standartlar arasında yer almaktadır.

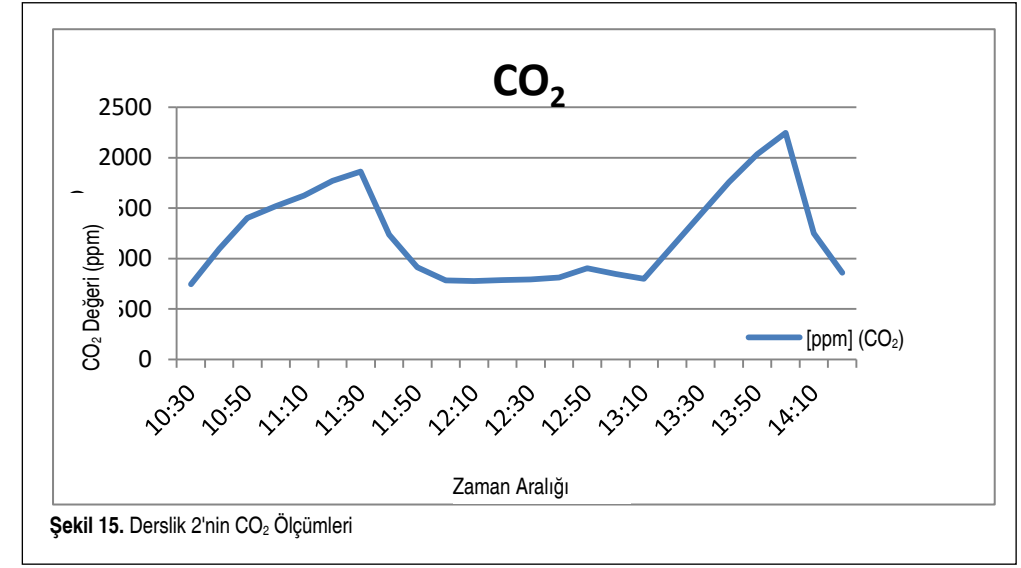
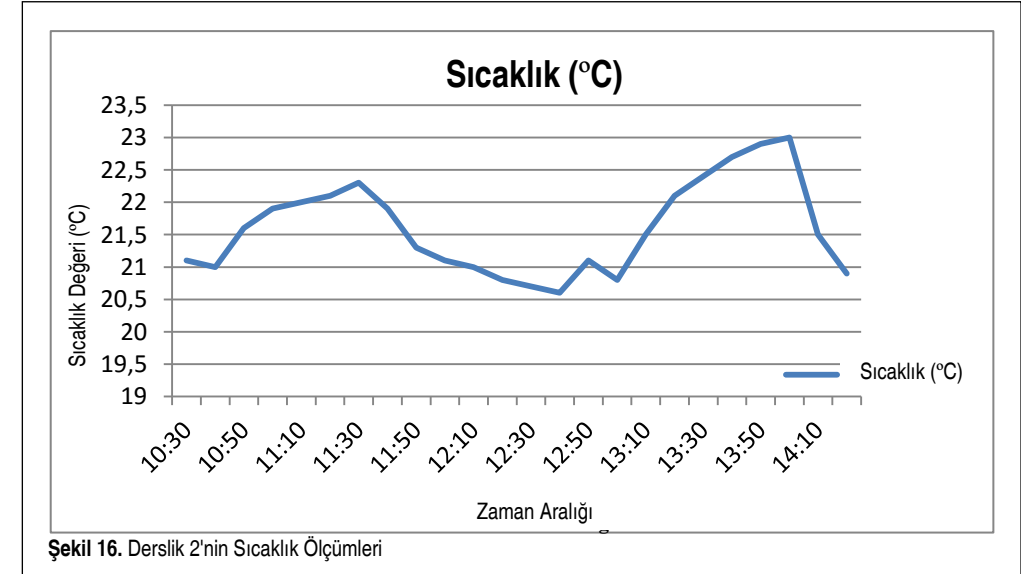
Not: Ölçümler ofis ve dersliklerin kullanıldığı zamanlar doğrultusunda yapılmıştır. Grafiklerdeki saat farklılıklar bundan kaynaklanmaktadır.

Şekil 12. Derslik 1'in CO₂ Ölçümleri

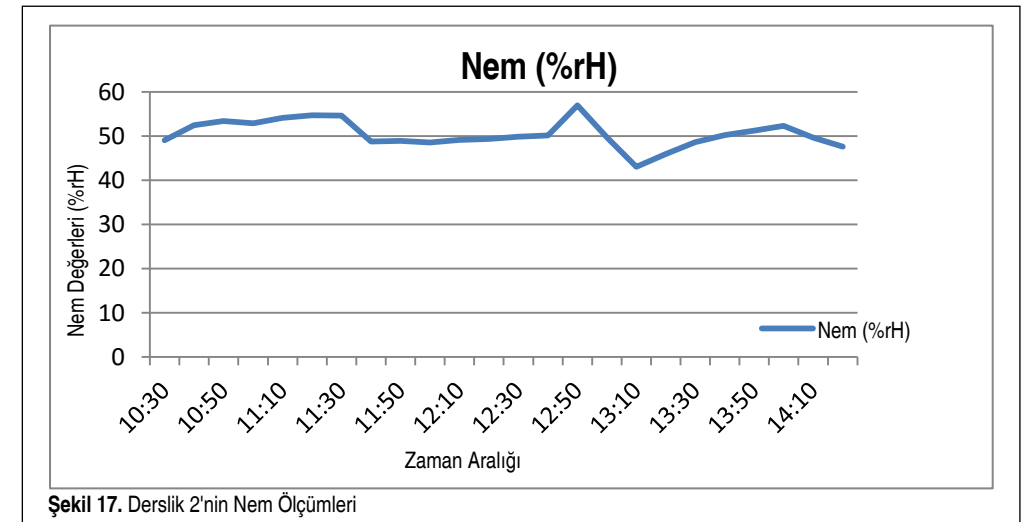
Şekil 13. Derslik 1'in Sıcaklık Ölçümleri



Şekil 14. Derslik 1'in Nem Ölçümleri

Şekil 15. Derslik 2'nin CO₂ Ölçümleri

Şekil 16. Derslik 2'nin Sıcaklık Ölçümleri



Şekil 17. Derslik 2'nin Nem Ölçümleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğal havalandırılmalı ve merkezi kaloriferli bir eğitim-öğretim yapısında iç hava kalitesi ölçümleri yapılmıştır. İç hava kalitesi parametreleri olarak, sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ miktarları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları grafikler üzerinde gösterilmiştir. İç hava kalitesinin iklimlendirme sistemleri ile doğrudan ilişkili olması, mekanik sistem çözümlmelerine etki etmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Diğer bir deyişle; ülkemizde mekanik sistem çözümlmelerinde rol oynayan makina mühendislerinin konu ile ilgili hassasiyet göstermesi gerekmektedir.

Grafiklerde görüldüğü üzere, “iç hava kalitesi” kapsamında belirli parametrelerin zaman zaman değiştiği görülmektedir. İnsan sağlığı açısından doğal havalandırmanın belirli periyotlarla yetersiz kaldığı ve bu problem için önlem alınması gerektiği açıktır. Ancak bir çok devlet üniversitesinde mekanik havalandırmanın bulunmadığı düşünülürse, ülkemizde genel olarak iç hava kalitesi kavramının önemi ve bu kavramın eğitim-öğretimde ne gibi olumsuzluklara yol açabileceği görülmemektedir. Bu bağlamda, üniversitelerin proje aşamalarında dersliklerdeki kişi sayılarını belirlemede tefrişlerin dışına çıkılmamalı ve hava debileri belirlenirken ASHRAE standartlarına göre mahale entegre sistemleri oluşturulmalıdır.

Merkezi kalorifer sistemi ile ısıtılan ofislerde standartlara uygun bir iç hava kalitesi oluşturmak için havalandırma sisteminin de tesis edilmesi gerekmektedir. Havalandırma sisteminde filtrasyonun, yani hava temizliğinin titizlikle yapılmasına özen göstermek gerekmektedir.

Enerji tasarrufu ve sağlıklı ortamlar için çalışanların iç hava kalitesi ile ilgili bilgilendirilmesi ve eğitimi gerekir. Ofis binalarında sigara içme odaları tesis edilmelidir. Fotokopi ve yazıcı gibi özel amaçlı makine veya cihazlar için ayrı ortamlar olmalıdır. İç ortam havası için kirletici kaynağı olabilecek halı ve mobilyadan kaçınılmalıdır.

Sonuç olarak, sağlıklı ve verimli bir yaşam için soluduğumuz havanın temiz olması, yani iyi bir iç hava kalitesinin sağlanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye’de farklı amaçlar için kullanılan kapalı ortamlar için iç hava kalitesi ile ilgili yeni standartların geliştirilmesi ve uygulanması büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

1. İMEKSAN. <http://www.imeksan.com/>, son erişim tarihi: 14.11.2014
2. Schramek, E. 1999. Recknagel-Sprenger Schramek- Isıtma ve Klima Tekniği El Kitabı, TTMD, Ankara.
3. ASHRAE. 1989. Standard 62- 1989- Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
4. ASHRAE. 2003. ASHRAE Handbook CD, 2001 Fundamentals, Chapter 9: Indoor Environmental Health, Atlanta.
5. Guo, H., Lee, S. C., Chan, L. Y. 2004. “Indoor Air Quality in Ice Skating Rinks in Hong Kong,” Environmental Research, vol. 94, p. 327-335.
6. Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S. S., Van Grieken, R. 2007. “Comparative Overview of Indoor Air Quality in Antwerp, Belgium,” Environment International, vol. 33, p. 789-797.
7. Berube, K. A., Sextona, K. J., Jonesb, T. P., Morenoa, T., Andersona, S., Richards, R. J. 2004. “The Spatial and Temporal Variations in PM10 Mass From Six UK Homes,” Science of the Total Environment, vol. 324, p. 41-53.
8. Mestl, H. E. S., Aunan, K., Seip, H. M. 2007. “Health Benefits From Reducing Indoor Air Pollution From Household Solid Fuel Use In China-Three Abatement Scenarios,” Environment International, vol. 33, p. 831-840.
9. ASHRAE. 2003. ASHRAE Handbook CD, 2001 Fundamentals, Chapter 9: Indoor Environmental Health, Atlanta.
10. HKGCC. 2006. The Clean Air Charter-A Business Guidebook, Hong Kong General Chamber of Commerce, www.cleanair.hk, son erişim tarihi: 12.09.2014.
11. Edwards, R. D., Schweizer, C., Llacqua, V., Lai, H. K., M., Bayer-Oglesby, L., Künzli, N. 2006. “Time- Activity Relationships to VOC Personal Exposure Factors,” Elsevier Atmospheric Environment, vol. 40, no. 29, p. 5685-5700.
12. Arıcı, M., Seçilmiş, M. 2005. “Kapalı Yüzme Havuzlarının Nem Kontrolü ve Ekonomik Olarak İklimlendirmesi,” VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir, 8-11 Ekim 2003, Bildiri Kitabı, s. 477-492.