

## A New Solution Approach for Determining Pressure Drop on Axial Non-Newtonian Flow in Annuli

 Teymuraz ABBASOV<sup>1,\*</sup>  Hatice BİLGİLİ<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>InonuUniversity, Faculty of Engineering, Department of Electric-Electronic Engineering, Battalgazi/MALATYA

<sup>2</sup>Inonu University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Battalgazi/MALATYA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, analytical calculation formula of radial coordinate of the region where the velocity of flow is maximum in the space between the concentric annuli as an empirical approach is proposed. In general, the graphic drawn according to the formula which depends on rheological conduct of the fluid environment ( $n$ ) and the ratio of radii of tubes ( $\delta$ ) is obtained on the following picture.

### Article Info:

Research article

Received: 07.08.2020

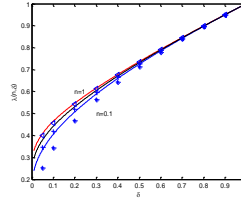
Revision: 14.09.2020

Accepted: 14.09.2020

### Highlights

- Power Law.
- Concentric Annuli.
- Pressure drop
- Coordinate of the region where the flow rate is max

### Keywords

 Non-Newtonian  
 Power-Law  
 Flow Rate  
 Pressure Drop  
 Rheology  
 Concentric Annuli.


**Figure A.** The variation of parameter  $\lambda(n, \delta)$  with respect to  $\delta$ .

In Figure A the symbols are numerical values from [11,12] for  $n = 0.1, 0.5, 1$ . The lines are the theoretical curves calculated according to Equation 9 in these values of  $n$ ;  $n = 0.1$  (blue),  $n = 0.5$  (black),  $n = 1$  (red). As seen in Figure A, the theoretical results are agree with the results given in the literature in the form of approximate tables/graphs. Thus, the graphical solutions proposed [11-12] nearly half a century ago were integrated with the analytical solution we proposed.

**Purpose:** The main purpose of this study is to create an analytical calculation of the instantaneous flow rate or pressure drop, which is important for non-Newtonian flow in the space between the concentric annuli. For this, an analytical formula is proposed for calculating the  $\lambda(n, \delta)$  radial coordinate, which is important for determining the non-Newtonian flow profile. This formula completes the previous formulas presented in the literature.

**Theory and Methods:** The solution of the problem was made by determining the radial coordinate of the point where the velocity profile is maximum, by following the approximate expression of the shear stress-shear rate characteristics according to the Power-Law model for the flow in the concentric annuli.

**Results:** The results showed that it is possible to determine the flow rate or pressure drop analytically in concentric cylindrical annuli. The analytical approach proposed for this purpose has been found to include other approximate solutions presented in the literature to date.

**Conclusion:** Simple empirical formula given in Equation 9 is proposed to calculate the parameter  $\lambda(n, \delta)$  easily, which is the coordinate of the region where the flow velocity is the maximum in the axial flows of non-Newtonian rheological fluids in concentric annuli. Although this equation is not an expression derived from the solution of the hydrodynamic problem, it applies at all variation intervals ( $n = 0 \dots \infty$ ) for non-Newtonian behavior parameter  $n$  of rheological fluids, and satisfies all hydrodynamic and rheological boundary conditions. Therefore, the approximate analytical calculation method proposed in this study will allow the calculation of basic parameters such as pressure change and flow rate without using complex methods such as interpolation, graph and table data.



# Non-Newtonian Sıvıların Aksiyel Halka Akışında Basınç Kaybının Belirlenmesi için Yeni Bir Çözüm Yaklaşımı

Teymuraz ABBASOV<sup>1\*</sup> Hatice BİLGİLİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Battalgazi/MALATYA

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Battalgazi/MALATYA

## Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 07.08.2020  
 Düzeltme: 14.09.2020  
 Kabul: 14.09.2020

## Anahtar Kelimeler

*Non-Newtonian*  
*Power-Law*  
*Akış Hızı*  
*Basınç Düşüşü*  
*Reoloji*  
*Konsentrik Annuli*

## Keywords

*Non-Newtonian*  
*Power-Law*  
*Flow Rate*  
*Pressure Drop*  
*Rheology*  
*Concentric Annuli*

## Öz

Bu çalışmada reodinamiğin temel problemlerinden biri olan akışkanların eş eksenli (konsentrik) silindirik borularda non-Newtonian (Power-Law) akışında basınç düşüşünü belirlemek için yeni yaklaşık analitik bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde, Fredrickson & Bird (1958) ve Hanks & Larsen (1979)'in sonuçları dikkate alınarak Power-Law akış profilinin boşluktaki akış hızının maksimum olduğu bölgenin koordinatlarını analitik olarak belirleyen formül önerilmiştir. Önerilen analitik formülün Power-Law reolojik modelin parametrelerinin bütün değişim aralığında ( $n = 0 \dots \infty$ ) geçerli olduğu saptanmıştır. Elde edilen sonuçların literatürde sunulan verilerle iyi uyum sağladıkları grafiklerle gösterilmiştir. Önerilen formülün farklı bilim dallarında hidrodinamik, ısı ve kütle transferi problemlerinin yaklaşık çözümlerine de önemli katkı sağlayacağı vurgulanmıştır.

## A New Solution Approach for Determining Pressure Drop on Axial Non-Newtonian Flow in Annuli

### Abstract

In this study, a new approximate analytical method is presented to determine the pressure drop in non-Newtonian (Power-Law) flow of concentric annuli of fluids, which is one of the main problems of rheodynamics. In this method, considering the results of Fredrickson & Bird (1958) and Hanks & Larsen (1979), the formula that analytically determines the coordinates of the region where the Power-Law flow profile has maximum flow velocity in annuli is proposed. The proposed analytical formula has been found to be valid across the entire change range ( $n = 0 \dots \infty$ ) of the parameters of the Power-Law rheological model. It is shown with the graphics that the results obtained accord with the data presented in the literature. It is emphasized that the proposed formula will also contribute significantly to the solutions of hydrodynamic, heat and mass transfer problems in different disciplines.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Non-Newtonian özellikli akışkan ortamların boru ve kanallardaki aksiyel akışı reodinamiğin temel işlemlerinden olup, çeşitli sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Petrol sanayisinde [1-4], gıda sanayisinde [5], ağır sanayi teknolojilerinde [1-4,6] ve diğer birçok alanda non-Newtonian sıvı akışının problemlerinin çözümleri halen güncel olarak kalmaktadır. İlave olarak günümüzde mikro ve nano akış sistemleri gibi yeni tür teknolojiler gelişmektedir. Gelişen bu tür teknolojilerle birlikte, non-Newtonian akış sistemlerinin farklı mikroeolojik problemleri de ortaya çıkmıştır [7]. Akışkan ortamların non-Newtonian özelliklerinin en etkili olduğu sistemlerden biri de tıp ve biyolojik sistemlerdir [8,9]. Özellikle kan ve kan analoglarının damarlardaki dolaşım mekanizmasının modellenmesinde ve kan ile ilgili yapılan invitro çalışmalarda akışkan ortamların reodinamiğinin düzgün olarak seçilmesi işlemi, mikroeolojik bu problemlerin çözümünde anahtar rol oynamaktadır [8-10]. Bu işlemlerin performansının yüksek olması için ise önemli parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Bunun için önce akışkan ortamın reodinamik modelinin doğru seçilmesi ve sonra anlık debi, basınç değişimi gibi önemli parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Non-Newtonian özellikli akışkan ortamların reolojik modelleri yaklaşık yüzyıl içerisinde birçok kez oluşturulmuştur. Bunlardan en yaygın olarak teorik ve pratik uygulama problemlerinin çözümünde kullanılanlar; Power-Law (Ostwald-de Waele), Bingham, Herschel Bulkley, Ellis, Sisko, Carry, Casson, Schulman gibi modellerdir [1-4].

Kan ve kan analoglarının reodinamiğinin incelenmesinde ise reolojik modeller arasında Power-Law, Casson, Carreau Yasuda gibi modellerin kullanılması daha yaygındır [9]. Biyomekanik ve hidrodinamik problemlerin analitik ve yaklaşık yöntemlerle analizinde ise, basit olmasından kaynaklı olarak en yaygın kullanılan model Power-Law (Ostwald-de Waele) reolojik modelidir [1-4]. Ancak bu model kayma hızının düşük ve çok büyük değerlerinde hatalı, kayma hızının belirli bir değer aralığında ise daha doğru sonuçlar vermektedir. Buna rağmen Power-Law akış modeli petrol, sondaj, ağır sanayi, gıda sanayisi, biyomekanikteki akışkan problemlerinde, bütün reolojik ortamlardaki ısı ve kütle transferi, konvektif taşınım olaylarının teorik ve pratik problemlerinin çözümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Yapılan çalışmalarda ortaya çıkan esas problemlerden biri non-Newtonian (Power-Law) akışkanların boru ve kanallardaki akış hızının, anlık debinin ve basınç değişiminin belirlenmesidir. Non-Newtonian akışkanların eş eksenli (konsentrik) veya iç içe kaçık eksenli (eksantrik) borulardaki akışının belirlenmesi hidrodinamiğin en temel problemlerinden biri olarak çok sayıda araştırmacılar tarafından incelenmiştir [11-27]. Halen de bu konu araştırmacıların dikkat merkezinde kalmaktadır [28]. Literatürde sunulan çalışmaların sonuçları incelendiğinde, bu problemle ilgili olarak, ancak Newtonian akış ortamları için analitik formüllerinin elde edildiği, fakat non-Newtonian modeller için numerik, grafo-analitik çözümler veya interpolasyon yaklaşımlar kullanıldığı açıkça görülmektedir [11-27]. Bu çözümler içerisinde ise temel yaklaşım Fredrickson & Bird (1958) ve Hanks & Larsen (1979) tarafından sunulan çözümlerdir [11,12]. Dahası Power-Law reolojik modelinin yapısına özgün hatalarından dolayı Fredrickson & Bird (1958)'ün yaptığı çözümlerde çoğu değerler interpolasyon işlemleri yapılarak elde edilmiştir [11]. Hanks & Larsen (1979) ise yaptıkları bir çalışmada, bu yaklaşımı geliştirerek anlık debi ve basınç değişimi için yaklaşık analitik çözüm formülünü önermişlerdir [12]. Fakat bu formülün içerdiği bazı parametreler de ancak tablo veya nomograflar vasıtasıyla belirlenebilmektedir. Dolayısıyla bu formüller tam anlamı ile analitik hesaplamalar için yeterince kullanışlı değildir. Daha sonraki geliştirilen teorik ve deneysel yaklaşımlar ise [29] ampirik ve yaklaşık formüller olup, yalnız belirli koşullar için geçerlidir. Non-Newtonian sıvıların pratik uygulamalarına ait bazı çalışmalarda [30] elde edilen analitik çözümler ise daha çok Newtonian'e yakın reolojik ortamlar için, yani zayıf non-Newtonian ortamlar için geçerlidir. Pratikte ise kullanılan ortamların reodinamiğinin incelenmesinde akışkanların non-Newtonian özelliklerinin geniş aralıklarda değiştiği bilinmektedir. Dolayısıyla, konsentrik boru ve yarıklarda Power-Law akış modellerinde hız profiline değişimi, anlık debi ve basınç düşüşleri için günümüze kadar kullanılan hemen hemen bütün formüller analitik bakımdan kullanışlı değildir.

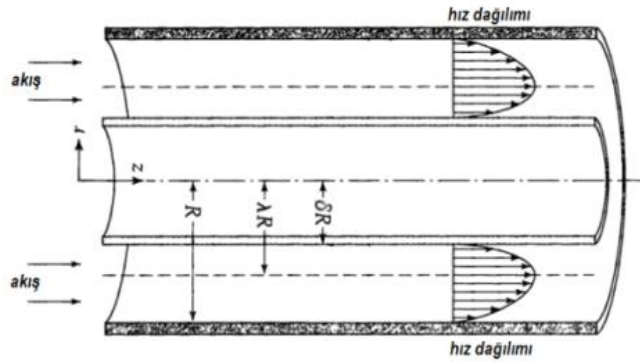
Power-Law reolojik özelliklere sahip olan akışkanların eş eksenli silindirik borularda akış değişimi ve basınç düşüşünün basit analitik bağlantılarının bulunamaması ise hem reomekanik hem de ısı ve kütle transferi problemlerinin çözümünü zorlaştırmakta, Power-Law akış sistemlerinin pratik uygulamalarına, tasarım ve optimizasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesine engel olmaktadır. Bu makalenin esas amacı; konsentrik borularda Power-Law aksiyel laminer akış durumunda debi ve basınç düşüşünü belirlemek için mevcut kullanılan grafiksel yaklaşık yöntemler veya veri tabloları yerine basit bir yaklaşık analitik model oluşturmaktır. Sunulan bu çalışmada Fredrickson & Bird (1958) ve Hanks & Larsen (1979) tarafından elde edilen veriler ve hesaplama modelleri baz alınmıştır [11,12]. Fakat bu modeller [11,12] tam olarak analitik modeller olmadığından onların içerdiği bazı parametrelerin analitik yöntemlerle belirlenmesi mümkün değildir. Bu parametreler ya yaklaşık olarak ya da grafik ve tablolarla verilmektedir. Bu çalışmada önerilen yeni modelde, analitik yöntemle kolaylıkla belirlenemeyen parametrelerin, yeni ve basit formüller kullanılarak hesaplanması hedeflenmiştir. Sınır değerler yaklaşımı olarak tanımladığımız bu modelde, non-Newtonian (Power-Law) akış durumunda, sınır koşullarının her zaman sağlandığı ve bu akış modelinin  $n = 1$  olması durumunda da kesinlikle Newtonian akış modeline dönüştüğü kriteri baz alınmıştır. Çünkü hem sınır koşulları hem de Newtonian akış formülleri analitik olarak bilinmektedir. Fredrickson & Bird (1958) ve Hanks & Larsen (1979) modellerinin analizinden görüldüğü gibi belirsiz olan parametre, esasen akışkanın borular arasındaki boşluktaki akış hızının

maksimum değerine karşılık gelen  $\lambda(n, \delta)$  radyal koordinattır [11,12]. Buna göre kayma gerilimi-kayma hızı ilişkisinin yaklaşık formülü kullanılarak Power-Law reolojik akışında  $\lambda(n, \delta)$  koordinatlarını belirlemek için basit bir analitik formül önerilmiştir. Bu formülün Fredrickson & Bird (1958) ve Hanks & Larsen (1979) tarafından önerilmiş nümerik verilerle iyi uyum sağladığı ve Power-Law modelinin reolojik parametrelerinin bütün değişim aralığı ( $n = 0 \dots \infty$ ) için geçerli olduğu gösterilmiştir. Sonuçlar grafiksel ve nümerik olarak literatür verileriyle kıyaslanmış ve iyi uyum sağladıkları saptanmıştır. Böylece non-Newtonian sıvıların kullanıldığı birçok teknolojik işlemlerde ortalama akış hızının, debinin veya basınç düşüşünün doğrudan analitik olarak hesaplanması imkânı sağlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Problemin Formülasyonu (Formulation of the Problem)

Şekil 1’de non-Newtonian (Power-Law) reolojik akışkanların konsentrik silindirik borulardaki izotermik, inelastik sıkıştırılmayan, laminer, aksiyel akış durumundaki hız profiline ve geometrik ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 1. Eş eksenli borularda akışın prensip şeması [1]

Silindirik koordinatlarda  $(r, \phi, z)$ , iç yarıçapı  $\delta R$  ve dış yarıçapı  $R$  olan bu iki, uzun silindir arasındaki halka kesitte sıvının aksiyel akış modelinin denklemi aşağıdaki gibidir [11];

$$\frac{dP}{dz} = \frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{rz})}{dr} \quad 1$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial \phi} = 0 \quad 2$$

Burada  $\frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P}{L}$  basınç düşümü,  $(r, \phi, z)$  silindirik koordinatlar olup,  $w(r)$  akışkanın  $z$  eksenine yönündeki akış bileşenidir. Denklem 1’in basit çözümü aşağıdaki gibidir [11].

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta PR}{2L} \left( \xi - \frac{\lambda^2}{\xi} \right) \quad 3$$

Burada  $\xi = \frac{r}{R}$  boyutsuz radyal koordinat,  $\lambda(n, \delta)$  akışkanın borular arasındaki bölgede akış hızının maksimum olduğu boyutsuz koordinat olup,  $\tau_{rz}(r = \lambda R) = 0$  koşullarına göre belirlenir.

Akışkanın Power-Law (Ostwald-de Waele) reolojik modeli aşağıdaki şekilde yazılır [1],

$$\tau_{rz} = \kappa \frac{\partial w}{\partial r} \left| \frac{\partial w}{\partial r} \right|^{n-1} \quad 4$$

Burada  $\kappa$  ve  $n$  reolojik parametrelerdir. Reolojik sıvının non-Newtonian davranış parametresi olan  $n$  parametresi için,  $n < 1$  akışkanın psedoplastik,  $n > 1$  akışkanın dilatant özelliklerini ifade eder.

Bu yaklaşımda akış denklemini eş eksenli borularda iki farklı bölge için ayrı ayrı çözmek gerekir. Bu denklemlerin birlikte çözümünden reolojik akışkanın akış hız profili aşağıdaki gibi elde edilir [1,11];

$$w = R \left( \frac{\Delta P \cdot R}{2\kappa L} \right)^{\frac{1}{n}} \int_{\delta}^{\xi} \left( \frac{\lambda^2}{\xi} - \xi \right)^{\frac{1}{n}} d\xi \quad \delta \leq \xi \leq \lambda \quad 5$$

$$w = R \left( \frac{\Delta P \cdot R}{2\kappa L} \right)^{\frac{1}{n}} \int_{\xi}^1 \left( \xi - \frac{\lambda^2}{\xi} \right)^{\frac{1}{n}} d\xi \quad \lambda \leq \xi \leq 1 \quad 6$$

Burada iç ve dış silindirin yüzeylerinde sıvının akışının kaymaz (no slip) olduğu dikkate alınmıştır [ $w(\delta) = w(1) = 0$ ]. Bu denklemlerde her iki bölgedeki akış hızının maksimum ve eşit olduğu belirsiz koordinat  $\lambda(n, \delta)$ , Denklem 5 ve Denklem 6'nın birbirine eşit olduğu duruma göre belirlenir,

$$\int_{\delta}^{\lambda} \left( \frac{\lambda^2}{\xi} - \xi \right)^{\frac{1}{n}} d\xi = \int_{\lambda}^1 \left( \xi - \frac{\lambda^2}{\xi} \right)^{\frac{1}{n}} d\xi \quad 7$$

Dolayısıyla Power-Law reolojik modele sahip olan akışkanın borulardaki izotermal ve laminar akış probleminin çözümü Denklem 7'de gösterilmiş integrallerin hesaplanmasına indirgenmiş olur. Bu eşitliğin sağlanmasında ise  $\lambda(n, \delta)$  parametresinin belirlenmesi anahtar rol oynamaktadır. Denklem 7'deki integrallerin çözümünden elde edilen sonuçlara göre reolojik akışkanın borulardaki akış hız profilleri, debisi ve basınç değişimleri kolaylıkla hesaplanabilir. Bunun sonucunda birçok sanayi alanlarındaki reolojik akışkan ortamların uygulanmasında ortaya çıkan pratik problemlerin çözümüne imkan sağlar [2,3]. Fakat Denklem 7'den  $\lambda(n, \delta)$  parametresinin analitik olarak hesaplanması o kadar da kolay değildir. Fredrickson & Bird (1958) tarafından sunulan grafo-analitik modelin [11] üzerinden yarım asırdan fazla bir zaman geçmesine rağmen, Denklem 7'yi sağlayacak genel bir analitik çözüm elde edilememiştir. Denklem 7'nin analitik çözümü bazı özel durumlar olan  $n = 1, 0.5, 0.33, 0.25$  v.s. değerleri için analitik olarak elde edilebilir [1,2,6,12]. Fakat Power-Law yasasına göre davranan non-Newtonian sıvılarda psedoplastik ve dilatant özelliklerin dikkate alınmasıyla  $n$  değeri geniş bir aralıkta ( $n = 0 \dots \infty$ ) değişebilmektedir. Oysa yukarıda sunulan çözümler bu geniş aralık için yeterli olmamaktadır. Denklem 7'yi sağlayabilecek  $\lambda(n, \delta)$  değerleri için literatürde, grafo-analitik, nümerik ve deneysel birçok çalışma sunulmuştur [1,11-27]. Fakat bütün bu çalışmaların tümünde çözüm yöntemi olarak deneysel, nümerik ve interpolasyon yaklaşımlar kullanılmış olup, daha sonraki çalışmalarda ise bu yaklaşımlar farklı yöntemlerle düzeltilerek geliştirilmiştir. Buna rağmen Power-Law reolojik modelin hesaplanması için yapılan nümerik yöntemlerin [11,12] sonucunda bile yine de  $\lambda(n, \delta)$  parametresi belirsiz olarak kalmıştır. [11]'de  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisi için, Denklem 7'yi interpolasyon yöntemi kullanarak çözmüş ve sonuçları tablo ve grafikler şeklinde sunmuştur. [12]'de ise Denklem 7'nin çözümünü geliştirerek non-Newtonian (Power-Law) akışkanların konsentrik borulardaki debisi için  $0 \leq \delta \leq 1$  aralığında aşağıdaki analitik formülü elde etmişlerdir.

$$Q = \frac{\pi n R^3}{1+3n} \left( \frac{\Delta P R}{2\kappa L} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ (1 - \lambda^2)^{\frac{n+1}{n}} - \delta^{\frac{n-1}{n}} (\lambda^2 - \delta^2)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad 8$$

Denklem 8'in içerdiği  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisi ise nümerik yöntemle hesaplanarak  $0.1 \leq n \leq 1$ ,  $0.05 \leq \delta \leq 1$  değerleri için tablo şeklinde sunulmuştur [11,12]. Konsentrik borularda Power-Law akış modelinde Denklem 8 her ne kadar basit ve kullanışlı görülse de, yine de farklı durumlar için  $\lambda(n, \delta)$  değerlerinin tablodan seçilmesi veya bu tablodaki değerlere göre interpolasyon yapılarak belirlenmesi gerekir [12]. Bu ise, Power-Law akış modelinin kullanıldığı çoğu uygulamalarda, özellikle ısı ve kütle transferi [4, 28], reodinamik [4], manyetik seperasyon [30] problemlerinin analitik yöntemlerle incelenmesine engel olmaktadır. Bu nedenle Denklem 8'i analitik olarak hesaplayabilmek için  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisinin oluşturulması gerekmektedir. Öte yandan önerilen ilişki [11,12]'de verilen değerleri ve diğer araştırmacıların elde ettikleri teorik ve deneysel verileri de sağlamalıdır. Başka bir deyişle yukarıdaki durumlar göz önüne alınarak  $\lambda(n, \delta)$  için ampirik de olsa uygun bir formül oluşturmak gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu ampirik formül aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

## 2.2. Problemin Çözümü (Solution of the Problem)

Öncelikle Power-Law reolojik modelinin bir hidrodinamik çözüm değil, yaklaşık bir model olduğunu hatırlatmakta yarar vardır. Bu modelin en önemli eksiklikleri ise psedoplastik akışkanlarda kayma hızının düşük değerlerinde ( $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ ) görünür viskozitenin sonsuza ( $\mu_a \rightarrow \infty$ ), kayma hızının büyük değerlerinde ise ( $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ) görünür viskozitenin sıfıra ( $\mu_a \rightarrow 0$ ) eşit olmasıdır [1,4]. Benzer zıtlıklar  $n \rightarrow 0$  ve  $n \rightarrow \infty$  durumlarında da oluşmaktadır. Bu nedenle literatürde sunulan interpolasyon ve diğer yaklaşık modeller [11-27] ve son yıllarda sunulan diğer çoğu çalışmalar [28] bu zıtlıkların ortadan kaldırılmasını hedeflemiştir. Çalışmalardaki asıl hedef ise konsentrik silindirik borulardaki boşlukta Power-Law akışında hız profiline, basınç düşümünün, sürtünme katsayısının belirlenmesidir. Fakat bütün bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar yalnız özel durumlar için geçerli olmuştur. Non-Newtonian sıvılar için, Newtonian sıvılardaki sonuçlar gibi basit, kullanışlı ve genel formüllerin oluşturulması yapılamamıştır. Oysa non-Newtonian sıvıların boru ve kanallardaki akış özelliklerinin analitik formüllerinin elde edilmesi, hem teorik hemde pratik bakımdan her zaman büyük önem taşımaktadır. Bu formüllerin elde edilebilmesi için aşağıdaki koşulların her zaman sağlanması gerektiğini varsayabiliriz:

- a) Power-Law reolojik modelinden elde edilen bütün formüllerin  $n = 1$  durumunda Newtonian akışlardaki uygun formüllere dönüşmesi gerekmektedir.
- b) Non-Newtonian akışlarda herhangi bir yöntemle (kuvvet serisi, diferansiyel, integral, basit cebirsel ilişkiler vs.) elde edilen yaklaşık ifadelerin, akışkanın  $n < 1$  durumunda psedoplastik,  $n > 1$  durumunda ise diatant akış özelliklerini sağlaması gerekir.
- c) Oluşturulan yaklaşık ifadeler mümkün olan mertebede  $n = 0$  ve  $n = \infty$  değerleri için de sonlu olmalıdır.

Bu koşullardan yola çıkarak Denklem 8'deki  $\lambda(n, \delta)$  fonksiyonunun, Denklem 1 ve 4 için de geçerli olabilecek yaklaşık formülü aşağıdaki şekilde önerilebilir [31]:

$$(3n + 1)\lambda^{\frac{3n+1}{n+1}} = (n + 1) \frac{1 - \delta^{\frac{3n+1}{n+1}}}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad 9$$

Bu formül tümüyle ampirik olarak görülse de, Power-Law akışkanların dar yarıklardaki akışlarının yaklaşık modellenmesinden de elde edilebilir. Denklem 9'daki fonksiyonun içerdiği üstler genelleştirilmiş non-Newtonian akış modelinden de türetilebilir [1]. Burada  $\lambda(n, \delta)$  ampirik formülünün oluşturulması işlemlerinde elde edilen son ifadenin Denklem 3'teki  $\tau_{rz} = 0$  koşulunu sağlaması gerektiği de dikkate alınmalıdır. Denklem 9'dan görüldüğü gibi önerdiğimiz yaklaşık formülde  $n = 1$  konulduğunda, konsentrik borularda Newtonian sıvıların aksiyel akışı için geçerli olan aşağıdaki bilinen ifade elde edilir:

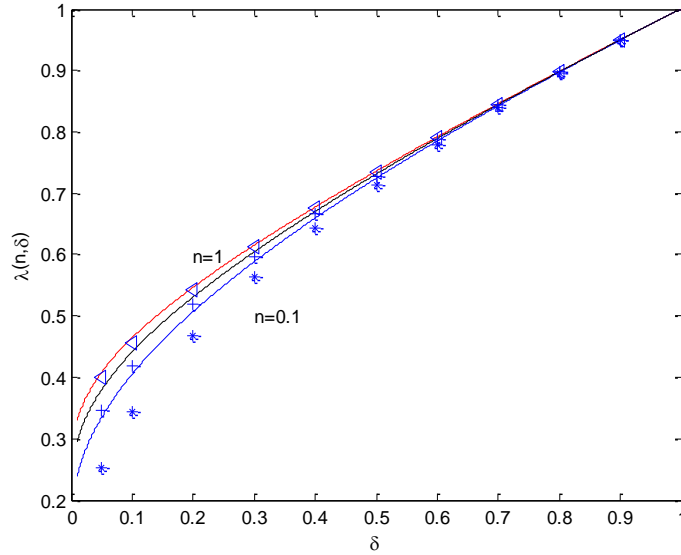
$$2\lambda^2 = \frac{1 - \delta^2}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad 10$$

Ayrıca Denklem 9'dan görüldüğü gibi  $\lambda(n, \delta)$ ,  $n = 0$  ve  $n = \infty$  değerlerinde de sonlu olarak kalmaktadır. Dolayısıyla Denklem 9, reolojik akışkanın non-Newtonian davranışını belirleyen  $n$  parametresinin  $n = 0 \dots \infty$  bütün aralığı için geçerlidir. Böylece, konsentrik borularda Power-Law akışında belli  $n$  ve  $\delta$  değerlerinde Denklem 9'dan hesaplanmış  $\lambda(n, \delta)$  değeri Denklem 8'de dikkate alınarak akışkanın debisi, ortalama akış hızı ve  $\frac{\Delta P}{L}$  basınç düşüşü hesaplanabilir. Bu hesaplamaların yapılması için önce Denklem 9'da önerilen  $\lambda(n, \delta)$  değerleri ile literatürden grafo-analitik ve nümerik yaklaşık yöntemlerle elde edilen  $\lambda(n, \delta)$  değerlerinin kıyaslanması gerekmektedir. Bu karşılaştırmalar ise sonuçlar ve tartışma bölümünde ele alınacaktır.

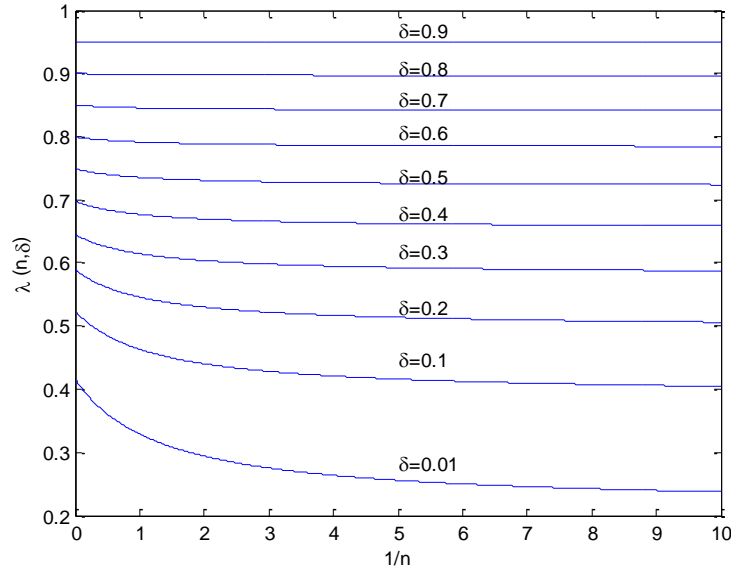
## 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Şekil 2'de  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisinin Denklem 9'a göre hesaplanmış grafiği gösterilmiştir. Şekil 2 üzerinde  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisinin [11,12]'de sunulmuş ve nümerik hesaplamalardan elde edilen sonuçları ile kıyaslanması bulunmaktadır. Şekil 2'den görüldüğü gibi  $n = 0 \dots \infty$  bütün aralıklarda Denklem 9'a göre

hesaplanan  $\lambda(n, \delta)$  değerleri literatürde sunulan nümerik sonuçlarla iyi uyum sağlamaktadır. Diğer taraftan Denklem 9 ile belirlenen  $\lambda(n, \delta)$  değişimi [15] tarafından sunulan sınır değer koşullarına göre belirlenmiş  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisinin  $0 < \delta < 0.5$  aralığındaki bütün özelliklerini de sağlamaktadır. Şekil 3'te ise farklı  $\delta$  değerleri için  $\lambda(n, \delta)$  ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 3'ten de görüldüğü gibi bu değişim [1]'de sunulan  $\lambda(1/n)$  grafiği ile iyi uyum sağlamaktadır.



**Şekil 2.**  $\lambda(n, \delta)$  parametresinin  $\delta$ 'a göre değişimi. Simgeler [11,12]'den elde edilmiş ve  $n = 0.1, 0.5, 1$  için nümerik değerlerdir. Çizgiler ise  $n$ 'in bu değerlerinde Denklem 9'a göre hesaplanmış teorik eğrilerdir ( $n = 0.1 \rightarrow$  mavi,  $n = 0.5 \rightarrow$  siyah,  $n = 1 \rightarrow$  kırmızı).



**Şekil 3.**  $\lambda(n, \delta)$  parametresinin  $1/n$ 'e göre değişimi grafikleri.

Dolayısıyla Denklem 9'da sunulan teorik formül non-Newtonian (Power-Law) sıvıların konsentrik silindirik boşluklardaki akışında  $n = 0 \dots \infty$  tüm aralıkta  $\lambda(n, \delta)$  değerlerini hesaplamaya imkân verir. Başka bir deyişle, non-Newtonian (Power-Law) sıvıların konsentrik silindirik boşluklardaki akışlarında akış hızı, basınç değişimi ve sürtünme katsayısı gibi önemli karakteristiklerinin hesaplanmasında anahtar parametre olan  $\lambda(n, \delta)$  değişimi belirlenmiş olur. En basit yaklaşımda bile  $\lambda(n, \delta)$  değerinin analitik

hesaplanması sonucu, hiç bir ek tablo ve grafik kullanmadan basınç değişimi veya debi Denklem 8'den kolaylıkla hesaplanabilir. Örneğin, aşağıdaki Tablo 1'de literatürde verilen ve yardımcı grafikler kullanılarak Denklem 8'e göre yapılan hesaplamalar ve tarafımızdan sunulan hesaplamalardan elde edilen basınç düşümü değerleri verilmiştir. Bu sonuçların birbirine yakın olduğu açıkça görülmektedir.

**Tablo 1.** Bazı değerler için  $\Delta P$  basınç değişimi hesabı sonuçları

Sıra No	Non-Newtonian akışkanın parametreleri	$\lambda(n, \delta)$		$\frac{\Delta P}{L}$ , kPa/m		Kaynak
		literatür	Denklem 8 ve 9	Literatür	Denklem 8 ve 9	
1	$R = 2.63 \cdot 10^{-2}$ m, $\delta = 0.406$ , $n = 0.716$ , $k = 0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.716}$ , $Q = 2.768 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	–	0.6771	4	4	[11]
2	$R = 2.63 \cdot 10^{-2}$ m, $\delta = 0.406$ , $n = 0.5$ , $k = 14.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.5}$ , $Q = 5.54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	–	0.6735	72.26	70.92	[11]
3	$R = 0.107$ m, $\delta = 0.533$ , $n = 0.2$ , $k = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.2}$ , $Q = 189 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	0.7398	0.7462	$11.6 \cdot 10^{-3}$	$12.93 \cdot 10^{-3}$	[32]
4	$R = 10^{-2}$ m, $\delta = 0.5$ , $n = 0.5$ , $k = 3.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.5}$ , $Q = 5.54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	0.7283	0.7308	234.17	242.77	[3]
5	$R = 0.01524$ m, $\delta = 0.507$ , $n = 0.33$ , $Q = 2.83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	0.727	0.7326	79.967	81.21	[15]*
6	$R = 0.2082$ m, $\delta = 0.405$ , $n = 0.22$ , $k = 3.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.22}$ , $Q = 18.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	–	0.6662	$97 \cdot 10^{-3}$	$103 \cdot 10^{-3}$	[21]*

\*Denklem 8'den farklı olan grafiksel yöntemle hesaplanmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Non-Newtonian (Power-Law) reolojik akışkanların konsentrik silindirik borulardaki aksiyel akışlarında akış hızının maksimum olduğu bölgenin koordinatı olan  $\lambda(n, \delta)$  parametresini analitik olarak kolaylıkla hesaplamak için Denklem 9'da verilen basit amprik formül önerilmiştir. Bu ilişki dikkate alındığında non-Newtonian akışkanların konsentrik silindirik borulardaki akışında Hanks & Larsen (1979) tarafından sunulan [12]  $Q$  veya  $\Delta P$  de Denklem 8'e göre direkt olarak hesaplanabilir. Bu sonuç, Denklem 8'in petrol, gıda ve polimer sanayisinde, triboloji sistemlerde, biyoreolojik ortamların (kan, kan analogları vs) manyetoforezi uygulamalarında gerekli olan hesaplamalarda kolaylıklar sağlar. Böylece, bu yaklaşım non-Newtonian (Power-Law) sıvıların konsentrik borulardaki akış özelliğini belirlemek için yarım asırdan fazla bir sürede çözümlenemeyen bir problemin yaklaşık analitik çözümü olarak da tanımlanabilir. Denklem 9 her ne kadar hidrodinamik problemin çözümünden türetilmiş bir ifade olmasa da, reolojik sıvıların non-Newtonian davranışlarının  $n = 0 \dots \infty$  tüm değişim aralıklarında geçerli olup, bütün hidrodinamik ve reolojik sınır koşullarını sağlamaktadır. Bu nedenle Denklem 9, Hanks & Larsen (1979) tarafından [12] verilen model ile birlikte non-Newtonian (Power-Law) akışkanlarının kullanıldığı geniş uygulama alanlarında tasarım, optimizasyon ve çalışma parametrelerinin belirlenmesinde analitik hesaplamalar için kullanılabilir. Dolayısıyla bu çalışmada önerilen yaklaşık analitik hesaplama yöntemi, günümüze kadar yapılan interpolasyon, grafik ve tablo verileri gibi karmaşık yöntemler kullanılmaksızın, basınç değişimi ve debi gibi temel parametrelerin hesaplamasına imkân sağlayacaktır.

#### TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: FDK-2017-775) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Chhabra, R. P., Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*, Butterworth-Heinemann.
- [3] Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (1999). *Non-Newtonian Flow in the Process Industries: Fundamentals and Engineering Applications*, Butterworth-Heinemann.
- [4] Schulman, Z. P. (1975). Convective heat and mass transfer in rheologically complex fluids, *Moscow, Energiya*, 352.
- [5] Ilicali, C. & Engez, S. T. (1996). Laminar Flow of Power Law Fluid Foods in Concentric Annuli, *Journal of Food Engineering*, 30, 255-262.
- [6] Bird, R. B., Armstrong, R. C., Hassager, O. (1987). *Dynamics of Polymer Liquids. Vol.1: Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Jiang, X. (2020). *Nanotechnology and Microfluidics*, Wiley-VCH, 419.
- [8] Danon, D., Knyszynski, A., Hayflick, L., Dieter Platt (eds.) (1988). *Blood Cells, Rheology, and Aging*, Springer Berlin Heidelberg.
- [9] Yılmaz, F., & Gundogdu, M. Y. (2008). A Critical Review On Blood Flow in Large Arteries; Relevance to Blood Rheology, Viscosity Models, and Physiologic Conditions, *Korea-Australia Rheology Journal*, 20(4), Pp. 197-211.
- [10] Rodkiewicz, C. M. (Ed.) (1983). *Arteries and Blood Flow*, Springer-Verlag Wien 417.
- [11] Fredrickson, A. G., & Bird, R. B. (1958). Non-Newtonian Flow in Annuli, *Ind. Eng. Chem.*, 50 (3), 347-352.
- [12] Hanks, R. W., & Larsen, K. M. (1979). The Flow Of Power-Law Non-Newtonian Fluids in Concentric Annuli. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 18(1), 33-35.
- [13] Rotem, Z. (1962). Non-Newtonian Flow in Annuli, *J. Appl. Mech., Trans. ASME, Ser. E*, 29, 421.
- [14] Kozicki, W., Chou, C. H., Tiu, C. (1966) Non-Newtonian Flow in Ducts of Arbitrary Cross-Sectional Shape, *Chem. Eng. Sci.* 21, 665-679.
- [15] Vaughn, R. D., Bergman P. D. (1966). Laminar Flow of Non-Newtonian Fluids in Concentric Annuli, *I&EC Process Design and Development*, 5(1), 44-47.
- [16] Wein, O., Nebrensky, J., Wichterle, K. (1970). Non-Newtonian Flow in Annuli, *Rheologica Acta*, 9(2), 278-282.
- [17] McEachern, D. W. (1966). Axial Laminar Flow of a Non-Newtonian Fluid in an Annulus, *AIChE J.* 12(2), 328-332.
- [18] Christopher P. R., & Christiansen, E. B. (1974). Axial, Laminar, Non-Newtonian Flow in Annuli, *I&EC Process Design and Development*, 13(4), 391-396.
- [19] Malik, R., Shenoy, U. V. (1991). Generalized Annular Couette Flow of a Power-Law Fluid, *Ind. Eng. Chem. Research*, 30(8), 1950-1954.
- [20] David, J., Filip, P. (1994). Quasisimilarity of Flow Behavior of Power-Law Fluids in Concentric Annuli, *Fluid Dyn. Res.* 14(2), 63-70.
- [21] David, J., Filip, P., (1996). Explicit Pressure Drop/Flow Rate Relation for Laminar Axial Flow of Power-Law Fluids in Concentric Annuli, *J. Pet. Sci. & Eng.* 16(4), 203-208.

- [22] Tiu, C., Bhattacharyya, S. (1974). Developing and Fully Developed Velocity Profiles for Inelastic Power Law Fluids in an Annulus, *AICHE J.*, 20(6), 1140-1144.
- [23] Mishra, P., Mishra, I. (1976). Flow Behavior of Power Law Fluids in an Annulus, *AICHE J.*, 22(3) 617-619.
- [24] Gupta, R. K., Chhabra, R. P. (1996). Laminar Flow of Power Law Fluids in Concentric Annuli, *AICHE J.* 42(7), 2080-2083.
- [25] Prasanth, N., Shenoy, U. V. (1992). Poiseuille Flow of a Power-Law Fluid Between Coaxial Cylinders, *J. Appl. Polym. Sci.*, 46(7), 1189-1194.
- [26] Worth, R. A. (1979). Accuracy of the parallel-plate analogy for representation of viscous flow between coaxial cylinders, *J. Appl. Polym. Sci.*, 24(2), 319-328.
- [27] Flip, P. (2007). Couette-Poiseuille Flow of Non-Newtonian Fluids in Concentric Annuli, *Proceedings of the 5th IASME/WSEAS Int. Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, Athens, Greece, August 25-27*, 9-14.
- [28] Haobo, Z., Honghai, F., Yinghu Z., Qi, P. (2014). A New Utility Calculation Model for Axial Flow of Non-Newtonian Fluid in Concentric Annuli, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(5), 945-952.
- [29] David, J., Filip, P. (1995). Relationship of annular and parallel-plate Poiseuille flows for power-law fluids. *Polym.-Plast. Technol. Eng. J.* 34, 947– 960.
- [30] Bilgili, H., Abbasov, T. (2019). Magnetic Separation Of Bioparticles In Rheological Suspension, III. Uluslararası AVRASYA Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, Uygulamalı Bilimler Kitabı 4-7 Nisan / Gaziantep-Türkiye, pp. 709-714.
- [31] Bilgili, H., Abbasov, T. (2020). Manyetik İlaç Hedefleme Uygulamalarında Kan Reolojik Akış Modellerinin Analizi, MAS 12. Uluslararası Matematik-Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, 18-19 Temmuz, İzmir-Türkiye, pp 5-6. ISBN -978-625-7139-16-8.
- [32] Leonov, E. G., Isaev, V. I. (2009). *Applied Hydro-Aeromechanics in Oil and Gas Drilling* John Wiley & Sons, Inc.



# Material Selection for Fuselage Using Integrated SWARA-MULTIMOORA Approach

 Aslı ÇALIŞ BOYACI<sup>1,\*</sup> Mehmet Çağrı TÜZEMEN<sup>2</sup>

Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 55139, Atakum/SAMSUN

Gazi University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 06580, Çankaya/ANKARA

## Graphical/Tabular Abstract

The variety of engineering materials is increasing day by day with alloying, post-treatments such as heat treatment, and the production of composite materials, besides pure elements. The selection of the most suitable material for each different part to be produced from such a large material pool is very important. In this study, which aims to select materials for the fuselage of the passenger aircraft, firstly criteria and alternatives have been determined in line with expert opinions. The criteria weights were obtained using SWARA method, and then alternative materials were ranked by MULTIMOORA method according to the criteria weights.

### Article Info:

Research article

Received: 20/07/2020

Revision: 12/09/2020

Accepted: 21/09/2020

### Highlights

- Passenger aircraft
- Fuselage
- SWARA-MULTIMOORA

### Keywords

Fuselage  
 Material selection  
 MCDM  
 SWARA  
 MULTIMOORA

Table A. The decision matrix

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>min</i>	<i>min</i>
$A_1$	1240	740	145	0,3	1185	0,16	238	1,6
$A_2$	1020	440	45	0,4	440	6,6	24	2,1
$A_3$	560	420	209	28	285	12,3	1,95	7,85
$A_4$	485	283	72,4	18	143	23,6	16	2,77
$A_5$	228	138	70,3	18	117	23,7	4,98	2,68
$A_6$	310	207	69	17	95	23,6	7,55	2,7
$A_7$	572	331	71	11	160	23,4	13	2,8
$A_8$	290	130	45	15	110	26	36,8	1,77
$A_9$	900	550	114	14	548	8,6	105	4,43

**Purpose:** In this study, it is aimed to select materials for the fuselage of the passenger aircraft. Criteria and alternatives are determined in line with expert opinions. In the study, 8 criteria such as density, tensile strength, shear strength, cost, and 9 alternatives are taken into consideration. An integrated SWARA-MULTIMOORA approach is used for the material selection process.

**Theory and Methods:** SWARA and MULTIMOORA methods were used in the study. SWARA method can value the criteria weights as one weight of criterion is higher or lower significant than the other criterion. MULTIMOORA is produced by adding the full multiplicative form to MOORA. This is not an independent MCDM method, it is based on the evaluation of other MOORA techniques and the ranking of the results by dominance. The criteria weights were obtained using SWARA method and alternatives were ranked by MULTIMOORA method

**Results:** The results have shown that tensile strength was the most important criterion affecting the selection process with a weight of 0,457; percentage elongation was the least important with 0,016.  $A_1$  (CFRP) was identified as the most suitable material and  $A_5$  (Al 5052-H32) as the least suitable material for fuselage according to the integrated SWARA-MULTIMOORA method.

**Conclusion:** Among the alternatives, the most suitable three materials for the fuselage were respectively CFRP, Ti-6Al-4V, and GFRP; the least suitable material was Al 5052-H32 according to the integrated SWARA-MULTIMOORA method. While Al was mostly used for fuselage in passenger aircraft production, it is seen that composite materials are used increasingly today. It was supported by our findings. As future work, results can be compared using different MCDM methods.



## Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA Yaklaşımı ile Uçak Gövdesi için Malzeme Seçimi

Aslı ÇALIŞ BOYACI<sup>1,\*</sup> Mehmet Çağrı TÜZEMEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Atakum/SAMSUN

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06580, Çankaya/ANKARA

### Öz

Saf elementlerin yanında alaşımlama, ısıtma işlemi gibi ardıl işlemler ve kompozit malzeme üretimi ile mühendislik malzemelerinin çeşidi her geçen gün daha da artmaktadır. Böylesine geniş bir malzeme havuzundan, üretilecek her bir farklı parça için en uygun malzemenin seçimi ise oldukça önemlidir. Uçağın önemli bir bölümünü oluşturan gövde için uygun malzeme seçimi termal ve mekanik özelliklerin yanı sıra hafiflik ve maliyet açısından da önem arz etmektedir. Yolcu uçağı gövdesi için malzeme seçiminin amaçlandığı bu çalışmada, öncelikle uzman görüşleri doğrultusunda kriterler ve alternatifler belirlenmiştir. Yoğunluk, çekme dayanımı, kayma dayanımı, maliyet gibi kriterlerin dikkate alındığı çalışmada, kriter ağırlıkları SWARA yöntemiyle elde edilmiş, ardından belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda alternatif malzemeler MULTIMOORA yöntemi ile sıralanmıştır. Sonuç olarak, yolcu uçağı gövdesi için en uygun ilk üç malzeme sırasıyla CFRP, Ti-6Al-4V ve GFRP olarak belirlenmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/07/2020  
Düzeltilme: 12/09/2020  
Kabul: 21/09/2020

### Anahtar Kelimeler

Uçak gövdesi  
Malzeme seçimi  
ÇKKV  
SWARA  
MULTIMOORA

### Keywords

Fuselage  
Material selection  
MCDM  
SWARA  
MULTIMOORA

## Material Selection for Fuselage Using Integrated SWARA-MULTIMOORA Approach

### Abstract

The variety of engineering materials is increasing day by day with alloying, post-treatments such as heat treatment, and the production of composite materials, besides pure elements. The selection of the most suitable material for each different part to be produced from such a large material pool is very important. The selection of suitable material for the fuselage, which constitutes an important part of the aircraft, is important in terms of lightness and cost, as well as thermal and mechanical properties. In this study, which aims to select materials for the fuselage of the passenger aircraft, firstly criteria and alternatives have been determined in line with expert opinions. In the study in which criteria such as density, tensile strength, shear strength and cost were taken into consideration, the criteria weights were obtained using SWARA method, and then alternative materials were ranked by MULTIMOORA method according to the criteria weights. As a result, three most suitable materials for the fuselage of the passenger aircraft were determined as CFRP, Ti-6Al-4V and GFRP, respectively.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eski çağlarda ulaşım araçlarının binek hayvanlarıyla sınırlı olması ulaşımı oldukça zorlaştırmakta; mesafeler günlerle, haftalarla ve hatta aylarla ifade edilmekte idi. Günümüzde ise çeşitli ulaşım araçlarının varlığı ile ulaşım kolaylaşmış, özellikle havayolu taşımacılığı ile mesafeler olabildiğince kısalmış ve dünyanın herhangi bir yerine ulaşım saatlerle ifade edilebilir hale gelmiştir. Ancak ulaştırma sektöründe yaşanan gelişmeler kimi sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlardan en önemlisi kuşkusuz karbon salınımında meydana gelen artıştır. Karbon salınımının artması, küresel ısınmadan buzulların erimesine, tatlı su kaynaklarının azalmasından canlı hayatının riske girmesine, iklim değişikliklerinden kuraklık veya sel gibi doğal felaketlere kadar uzanan zincirleme sonuçları doğurabilmektedir [1].

Uluslararası havacılık sektörü insan kaynaklı karbon salınımının yaklaşık %2,5'ini oluşturmaktadır [1]. 2010 yılında 2,4 milyar yolcu taşıyan bu sektörün 2050 yılında 16 milyar yolcu taşıması ve bu salınımların

planlanandan çok daha hızlı artarak %300 kadar artması beklenmektedir [2, 3]. Havacılık sektöründeki hızlı büyümenin doğurduğu rekabet neticesinde firmaların hayatta kalma savaşı ve çevresel sorunlar ile aynı anda başa çıkma çabası, mühendisleri var olanı geliştirmeye ve yeni çözüm arayışlarına sürüklemiştir. Bu doğrultuda yapılabilecek iyileştirmelerin başında motorların verimliliğinin artırılması, tasarım optimizasyonu ile sürtünmenin azaltılması, yapısal tasarım değişikliği ve/veya malzeme değişikliği ile uçak ağırlığının azaltılması gelmektedir. Bu noktada kanat, kuyruk ve burun gibi bölgelerde yapısal tasarım değişimi veya uçağın her bir parçası için farklı malzemelerin değerlendirilip kullanılması sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Uçağın genel tasarım kısıtlamaları ve kararlılığı dolayısıyla geniş çaplı bir yapısal tasarım değişikliği mümkün olamamaktadır. Bu sebeple uçağın ilgili parçasında doğru malzeme seçimi önemli bir hal almaktadır. Malzeme seçimi ile uçağın ağırlığında meydana gelebilecek iyileştirme her bir uçuşta daha az yakıt tüketimini dolayısıyla uçağa daha az yakıt ikmalini sağlayabilecektir. Bu durumda uçağın ağırlığında meydana gelebilecek malzeme türünden kaynaklı iyileşmeye ek olarak yakıt ikmalinden kaynaklı bir iyileşme de söz konusu olabilecektir. Ağırlıktaki 1 kg'lık düşüş her 1000 km'de 20 ile 30 gr. arasında yakıt artırımına denk gelmektedir [4]. Yıllık uçuş sayısından yola çıkılarak yapılan bir hesapla uçakların bir yıl içerisinde yaklaşık 85,5 milyar km [5, 6] yol kat ettiği düşünüldüğünde uçağın 1 kg hafiflemesiyle yılda 2 milyon kg'ın üzerinde yakıt tasarrufu sağlayabileceği görülmektedir. Tüketilen her bir kg jet yakıtının 3,6 kg CO<sub>2</sub> salınımına neden olduğu hesaplandığında bunun hiç de küçümsenmeyecek bir değer olduğu aşikârdır [7]. Hafiflik aynı zamanda faydalı yük ve menzili de etkilemektedir [8].

Yoğunluk, çevresel etkileri bakımından uçak tasarımında malzeme seçimi için önemli bir kriterdir. Ancak tek başına yeterli değildir. Uçak malzemesi seçimini etkileyecek farklı kriterler de söz konusudur. Uçak gövdesi kalkış, uçuş, iniş ve taksit esnasında çok çeşitli yüklere veya darbelere maruz kalabilmektedir. Örneğin kuş sürüsüne çarpma olayı çoğunlukla uçağın düşük irtifada olduğu kalkış ve iniş esnasında meydana gelmektedir. Uçağın kuş çarpmasına en çok maruz kaldığı bölgeleri ise burun, motor ve kanat kısımlarıdır [9]. Seyir esnasında kanatlar sayesinde bir kaldırma kuvveti oluşmakta ve bu kuvvet uçağın ağırlığını dengelemektedir. Ancak seyir irtifasında hava değişkenlik gösterebilmekte hatta uçak hava boşluklarına düşebilmektedir. Bu esnada kanatlara ve gövdeye değişken yükler gelebilmektedir. İniş esnasında iniş takımlarına darbeli yükler etki etmektedir. Bu yük iniş takımlarından gövdeye, gövdeden kanatlara kadar aktarılmaktadır. Uçak gövdesinin gelebilecek bütün bu dinamik yüklere dayanabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ayrıca uçak yükselirken ve alçalırken dış hava sıcaklıkları da oldukça değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle uçak gövdesinde sıcaklık değişimlerine de dayanıklı malzemeler kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte kullanılan malzemenin maliyeti de her zaman önemli bir kriter olmuştur. Bu noktada, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları, çoklu ve çeşitli ölçüm birimlerini içeren karşılaştırma problemleri için sağlamlık ve esneklik sağladığından, beklenen performansı gösterebilecek aday malzemeler arasından en uygun alternatifin seçimi amacıyla kullanılabilir [10, 11]. ÇKKV yöntemleri ile istenen fiziksel ve mekanik özellikleri optimum oranda karşılayan malzemelerin belirlenmesi mümkündür. Böylece, mühendislerin prototipleme ve çeşitli mekanik testler gibi zaman alıcı ve pahalı yöntemlerden önce en uygun malzemeyi seçebilmeleri sağlanabilir. ÇKKV yöntemleri yardımıyla, sayısal analizden önce malzemeler uygunluklarına göre sıralanabilir ve böylece analiz süresi kısaltılabilir. Bu sayede hem zamandan hem de maliyetten tasarruf sağlanabilir.

Bu çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) ve MULTIMOORA (MOORA plus Full Multiplicative Form) ile yolcu uçağı gövdesi için malzeme seçimi amaçlanmıştır. Yoğunluk, çekme dayanımı, kayma dayanımı, maliyet gibi kriterlerin dikkate alındığı çalışmada, kriter ağırlıkları uzman görüşleri doğrultusunda SWARA yöntemi ile belirlenmiş; yine uzmanlar tarafından belirlenen alternatif malzemeler de SWARA ile belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda MULTIMOORA yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Literatürde, mühendislik uygulamalarında malzeme seçimi üzerine gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcut olup bu çalışmaların çoğu otomobil parçaları seçimi üzerinedir [12-16]. Buna rağmen literatürde uçak malzemesi seçimi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Dozic ve Kalic, uçak türü seçimi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, AHP ve Even Swaps Metodu (ESM)'nu kullanmışlardır [17]. Bir diğer çalışmada ise Dozic vd. yolcu uçağı türünü seçmek için bulanık AHP yöntemini kullanmışlardır. Yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için bir örnek olay incelemesine yer vermişlerdir [18].

SWARA yöntemi literatürde, alışveriş merkezi yer seçimi [19], ambalaj tasarımı seçimi [20], personel seçimi [21], bulut depolama hizmet sağlayıcılarının değerlendirilmesi [22], sunucu seçimi [23], fitness

merkezlerinin değerlendirilmesi [24], memnuniyet düzeyi analizi [25], tedarikçi seçimi [26], eğitim göstergeleri açısından Düzey-1 bölgelerinin değerlendirilmesi [27], akrobasi uçağı seçimi [28], yenilenebilir enerji için sürdürülebilirlik göstergelerinin değerlendirilmesi [29] gibi farklı alanlardaki birçok problemin çözümünde kullanılmıştır.

Literatürde MULTIMOORA yöntemi ile gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları, proje yönetimi [30], personel seçimi [31, 32], özel eğitim ve rehabilitasyon merkezi seçimi [33], endüstriyel robot seçimi [34], ekskavatör alternatiflerinin değerlendirilmesi [35], malzeme seçimi [36], ülke riski değerlendirmesi [37], imalat sanayi sektörlerinin sıralanması [38], bisiklet paylaşım istasyonlarının değerlendirilmesi [39], akıllı bisiklet paylaşım programlarının değerlendirilmesi [40], teknolojik tahmin yöntemi seçimi [41], depolama sahası seçimi [42] üzerinedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, SWARA ve MULTIMOORA yöntemleri kullanılarak uçak malzemesi seçimi üzerine gerçekleştirilmiş bir çalışmanın mevcut olmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda çalışmanın, literatürdeki bu boşluğu doldurması beklenmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. SWARA Yöntemi (SWARA Method)

SWARA yöntemi, Keršulienė vd. tarafından 2010 yılında önerilmiştir [43]. SWARA karmaşık bir yöntem olmayıp, uzmanların aynı amaç uğruna birlikte çalışabilmesini kolaylaştırmaktadır. Dahası, AHP gibi kriter ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla kriterler arasında daha az sayıda karşılaştırma içerdiğinden zamandan tasarruf sağlamaktadır [19, 20]. SWARA yönteminin adımlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür [20, 43]:

Adım 1: Karar vericiler tarafından en önemli kriter ilk sırada olacak şekilde kriterler sıralanır.

Adım 2: İkinci kriterden başlanarak, her bir kriter için  $j$  kriterinin bir önceki kriter olan  $(j-1)$ 'e göre göreceli önemi belirlenir. Bu oran ortalama değer karşılaştırmalı önemi ( $s_j$ ) olarak ifade edilir.

Adım 3: Denklem 1 kullanılarak katsayı ( $c_j$ ) belirlenir.

$$c_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad 1$$

Adım 4: Her bir kriter için düzeltilmiş ağırlık değeri ( $q_j$ ) Denklem 2 yardımıyla hesaplanır.

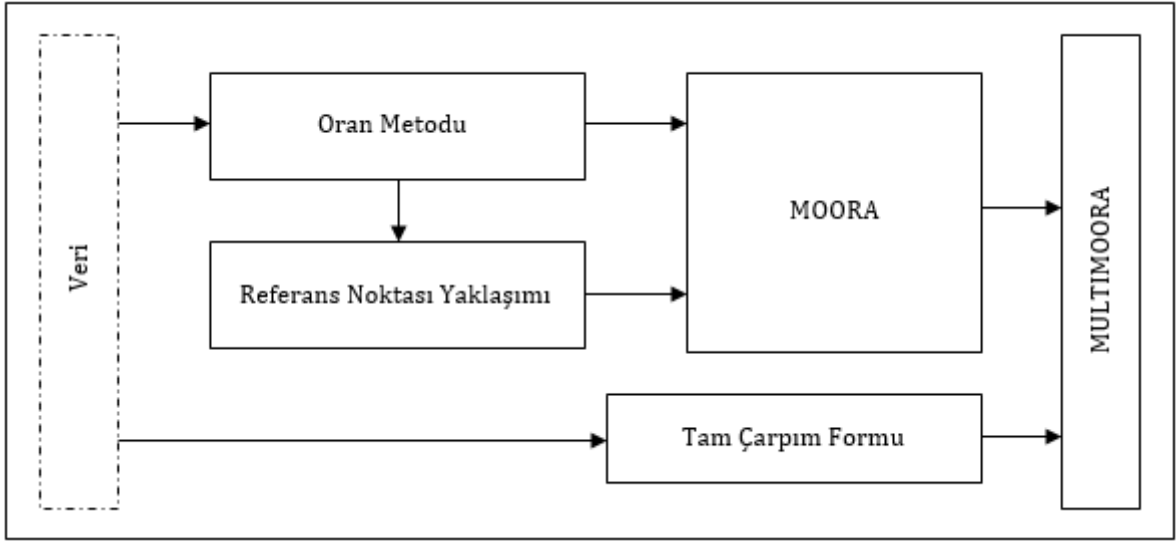
$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{c_j} & j > 1 \end{cases} \quad 2$$

Adım 5: Kriter ağırlıkları ( $w_j$ ) Denklem 3 yardımıyla hesaplanır.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad 3$$

### 2.2. MULTIMOORA Yöntemi (MULTIMOORA Method)

MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) yöntemi, ilk olarak Brauers ve Zavadskas tarafından 2006 yılında önerilmiştir [44]. Brauers ve Zavadskas, Oran Metodu ve Referans Noktası Yaklaşımı'ndan oluşan MOORA yöntemine, 2010 yılında Tam Çarpım Formu'nu da ekleyerek yöntemi MULTIMOORA olarak genişletmiş ve daha sağlam bir hale getirmişlerdir [30]. MULTIMOORA yöntemi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Şekil 1):



Şekil 1. MULTIMOORA yönteminin aşamaları [45]

**MOORA-Oran Metodu:** Oran Metodu için öncelikle farklı amaç veya kriterlere göre farklı alternatiflerin değerlerini gösteren karar matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisinde  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  kriter sayısı,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  ise alternatif sayısı olmak üzere  $x_{ij}$ ,  $j$  alternatifinin  $i$  kriterine göre değerini göstermektedir.  $x_{ij}^*$  ise  $j$  alternatifinin  $i$  kriterine göre normalleştirilmiş değerini gösteren boyutsuz bir sayı olup genellikle  $[0;1]$  aralığındadır. Karar matrisi Denklem 4 kullanılarak normalize edilmektedir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad 4$$

$i = 1, 2, \dots, g$  fayda yönlü kriterleri,  $i = g + 1, g + 2, \dots, n$  ise maliyet yönlü kriterleri ifade etmek üzere,  $j$  alternatifinin tüm kriterlere göre normalleştirilmiş performans değeri ( $y_j^*$ ) Denklem 5 ile elde edilir.

$$y_j^* = \sum_{i=1}^g x_{ij}^* - \sum_{i=g+1}^n x_{ij}^* \quad 5$$

Karar vericilerin bazı kriterlere daha fazla önem vermek istemeleri durumunda kriter ağırlıkları ( $s_i$ ) hesaba katılarak  $j$  alternatifinin tüm kriterlere göre normalleştirilmiş performans değeri Denklem 6 ile elde edilmektedir.

$$y_j^* = \sum_{i=1}^g s_i x_{ij}^* - \sum_{i=g+1}^n s_i x_{ij}^* \quad 6$$

$y_j^*$  değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması ile en uygun alternatif belirlenir [46].

**MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı:** Referans Noktası Yaklaşımı'nda, Oran Metodu'na ek olarak, her bir kriter için referans noktaları ( $r_i$ ), belirlenir. Fayda yönlü kriterler için en yüksek, maliyet yönlü kriterler için ise en düşük  $r_i$  değerleri referans noktaları olarak belirlenir.  $x_{ij}^*$  değerlerinin, belirlenen bu noktaların her biri ile olan mesafesi Denklem 7 kullanılarak hesaplanır.

$$r_i - x_{ij}^* \quad 7$$

Alternatifler ve referans noktası arasındaki mesafeyi ölçmek için Tchebycheff Min-Max Metrik kullanılır (Denklem 8) [44]. Kriterlerin farklı ağırlıklara sahip olması durumunda, Tchebycheff Min-Max Metrik ile hesaplama yapılmadan önce Denklem 9 kullanılır. Alternatiflerin sıralaması, Denklem 8 ile elde edilen değerlerin artan düzende sıralanması ile sağlanır.

$$\min_{(j)} \left\{ \max_{(i)} |r_i - x_{ij}^*| \right\} \quad 8$$

$$|s_i r_i - s_i x_{ij}^*| \quad 9$$

**Tam Çarpım Formu ve MULTIMOORA:** Tam Çarpım Formu'na göre  $j$ . alternatifin toplam faydası  $U'_j$ ,  $A_j$  (Denklem 11) ve  $B_j$  (Denklem 12) değerleri elde edildikten sonra Denklem 10 kullanılarak hesaplanır [30].

$$U'_j = \frac{A_j}{B_j} \quad 10$$

$$A_j = \prod_{i=1}^g x_{ij} \quad 11$$

$$B_j = \prod_{i=g+1}^n x_{ij} \quad 12$$

Burada,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  kriterlerin sayısını,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  alternatiflerin sayısını,  $g$  fayda yönlü kriterlerin sayısını,  $(n - g)$  maliyet yönlü kriterlerin sayısını göstermektedir. En uygun alternatifin belirlenmesi ise,  $U'_j$  değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması ile gerçekleşmektedir.

MULTIMOORA yöntemine göre alternatiflerin değerlendirilmesi, MOORA-Oran Metodu ve MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı'ndan elde edilen sonuçlar ile Tam Çarpım Formu'ndan elde edilen sonuçların baskınlık teorisi dikkate alınarak birleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Baskınlık teorisinde aşağıdaki unsurlara dikkat edilir [47]:

### Baskınlık

- **Mutlak Baskınlık;** bir alternatifin diğer tüm alternatiflere göre baskın olması durumu olup MULTIMOORA sıralamasında (1-1-1) şeklinde gösterilir.
- **Genel Baskınlık** ise üç yöntemden ikisinde baskınlık sağlanması durumu olup  $a < b < c < d$  için aşağıdaki şekilde ifade edilir:
  - (d-a-a) genellikle baskındır (c-b-b)'ye;
  - (a-d-a) genellikle baskındır (b-c-b)'ye;
  - (a-a-d) genellikle baskındır (b-b-c)'ye.

### Geçişlilik

Eğer a, b'ye baskın ve b, c'ye baskın ise a, c'ye de baskındır.

### Tam Baskınlık

Bir alternatifin diğer bir alternatif üzerindeki tam baskınlığıdır. Örneğin, (a-a-a) tam baskındır (b-b-b)'ye.

### Dengelilik

- **Mutlak Dengelilik;** iki alternatifin de (e-e-e) gibi aynı sonuca sahip olması durumudur.
- **Kısmi Dengelilik;** üç sıralamadan ikisinin dengeli olması durumudur. Örneğin, (5-e-7) ve (6-e-3).



### **Döngüsel Akıl Yürütme**

(11-20-14) genellikle baskındır (14-16-15)'e;

(14-16-15) genellikle baskındır (15-19-12)'ye;

Fakat (15-19-12) genellikle baskındır (11-20-14)'e.

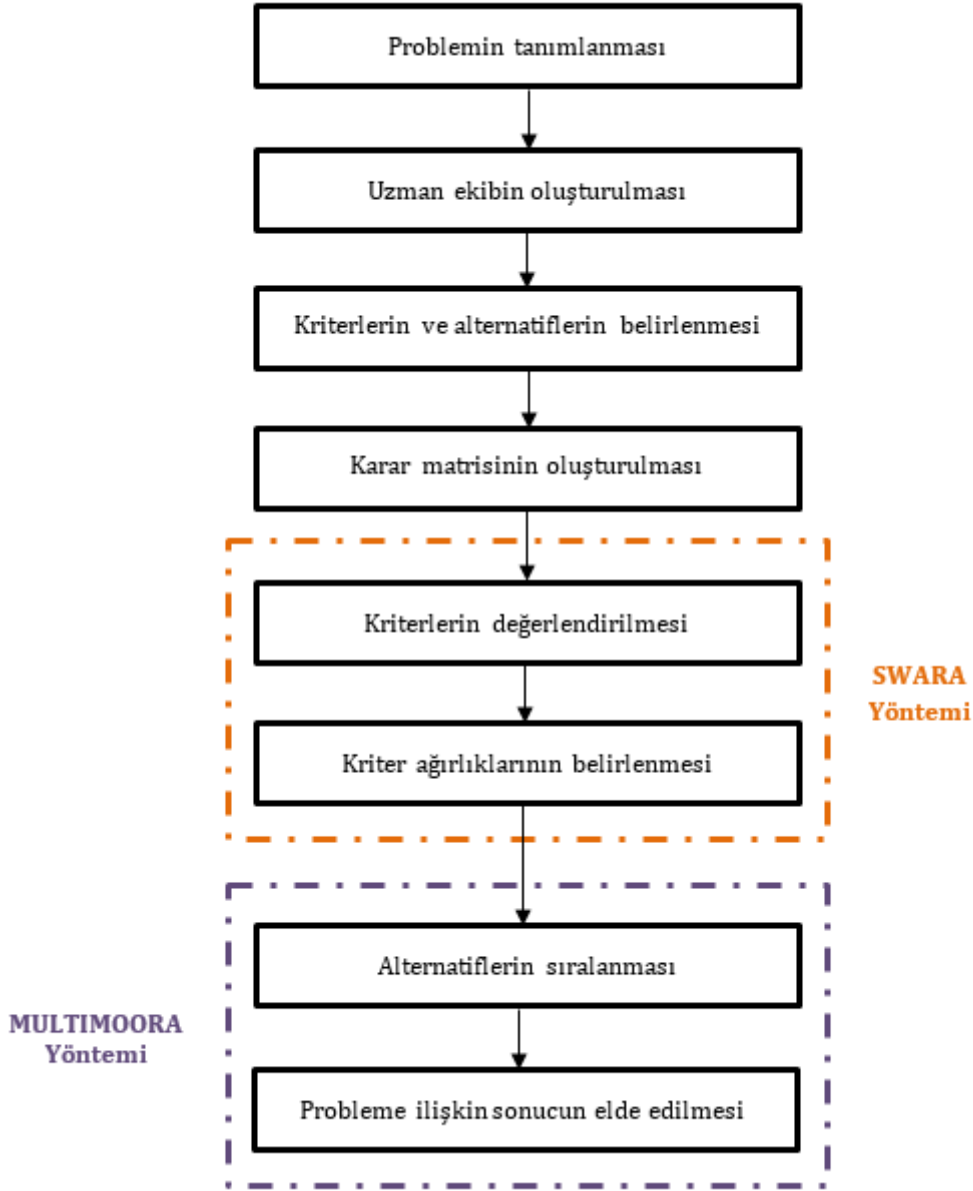
Böyle bir durumda üç alternatif de aynı sıraya atanır [47].

### **3. UYGULAMA (APPLICATION)**

Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemi ile yolcu uçağı gövdesi için malzeme seçiminin gerçekleştirildiğı bu çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 2'de verilmektedir.

#### **3.1. Problemin Tanımı (Definition of the Problem)**

Mühendislik malzemeleri gerek alaşımlama gerek ısıl işlem gibi son işlemler gerekse kompozit malzeme yapımı ve nanopartikül eklentisi ile sürekli çeşitlendirilmeye devam etmektedir. Mühendisler uygulama alanına göre on binlerce malzeme arasından uygun olanını seçmek durumundadır. Havacılık alanında istenen özellikleri ise bu malzemelerin yalnızca %0,05'i karşılayabilmektedir [48]. Alüminyum (Al) alaşımı uzun yıllardır uçak yapımında en çok kullanılan malzemelerdendir. Kullanım oranı düşmekle birlikte hala sıklıkla kullanılmaktadır [9, 49]. Saf Al'un mekanik özellikleri istenilen seviyede olmadığı için, çeşitli alaşım elementleri ve ısıl işlemler ile yüksek mukavemetli Al alaşımları elde edilmekte ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Al, çelik ve titanyuma (Ti) göre daha hafiftir. Ti özellikle değişken sıcaklıklar gibi zorlu servis koşulları düşünüldüğünde benzersiz özellikler sunabilmektedir [8, 50]. Magnezyum (Mg) da Ti ve Al gibi alaşım olarak kullanılmaktadır. Mg alaşımlarının sertlik ve şok emici özellikleri malzeme seçiminde belirgin bir rol oynamaktadır [49]. Üstelik yoğunluğu çok düşük olduğundan hafiflik de sağlamaktadır. Son yıllarda ise uçak yapımında kompozit malzeme kullanımı gitgide artmaktadır. Bunun en önemli nedenleri yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve hafifliğe sahip olmalarıdır [51, 52].



Şekil 2. Uygulamaya ait akış diyagramı

Yukarıda bahsi geçen malzeme özellikleri ve daha önce değinilen uçakların maruz kaldığı yükler, servis koşulları ve beklenen özellikler dikkate alınarak uçak gövdesi seçimi için alternatif malzemeler ve kriterler üç kişilik uzman ekip tarafından belirlenmiştir. Buna göre alternatifler; karbon fiber takviyeli polimer kompozit (CFRP), cam fiber takviyeli polimer kompozit (GFRP), çelik alaşımı (AISI 4130), Al alaşımları (Al 2024-T3, Al 5052-H32, Al 6061-T6 ve Al 7075-T6), Mg alaşımı (AZ31B) ve Ti alaşımıdır (Ti-6Al-4V). Kriterler ise çekme dayanımı, kayma dayanımı, elastisite modülü, yüzde uzama, yorulma, termal genişleme, maliyet ve yoğunluktur. Maliyet ve yoğunluk kriterleri maliyet yönlü iken diğer kriterler fayda yönlüdür. Çalışmanın geri kalanında sekiz kriter ve dokuz alternatif aşağıdaki sembollerle ifade edilecektir:

**Kriter 1 (K1):** Çekme dayanımı [MPa]

**Kriter 2 (K2):** Kayma dayanımı [MPa]

**Kriter 3 (K3):** Elastisite modülü [GPa]

**Kriter 4 (K4):** Yüzde uzama (%)

**Kriter 5 (K5):** Yorulma [MPa]

**Kriter 6 (K6):** Termal genişleme [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]

**Kriter 7 (K7):** Maliyet [\$/kg]

**Kriter 8 (K8):** Yoğunluk [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

**Alternatif 1 (A1):** CFRP

**Alternatif 2 (A2):** GFRP

**Alternatif 3 (A3):** AISI 4130

**Alternatif 4 (A4):** Al 2024-T3

**Alternatif 5 (A5):** Al 5052-H32

**Alternatif 6 (A6):** Al 6061-T6

**Alternatif 7 (A7):** Al 7075-T6

**Alternatif 8 (A8):** AZ31B

**Alternatif 9 (A9):** Ti-6Al-4V

Alternatiflerin kriterler bazındaki değerleri ile oluşturulan başlangıç karar matrisi Tablo 1’de sunulmaktadır [53, 54].

**Tablo 1.** Başlangıç karar matrisi

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>min</i>	<i>min</i>
$A_1$	1240	740	145	0,3	1185	0,16	238	1,6
$A_2$	1020	440	45	0,4	440	6,6	24	2,1
$A_3$	560	420	209	28	285	12,3	1,95	7,85
$A_4$	485	283	72,4	18	143	23,6	16	2,77
$A_5$	228	138	70,3	18	117	23,7	4,98	2,68
$A_6$	310	207	69	17	95	23,6	7,55	2,7
$A_7$	572	331	71	11	160	23,4	13	2,8
$A_8$	290	130	45	15	110	26	36,8	1,77
$A_9$	900	550	114	14	548	8,6	105	4,43

### 3.2. SWARA Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi (Determination of the Weights of the Criteria Using SWARA Method)

Bu alt bölümde kriter ağırlıkları karar vericiler (KV) tarafından belirlenmiştir. Bu aşamada öncelikle, KV’ler tarafından en önemli kriter ilk sırada olacak şekilde kriterler sıralanmış, ardından  $s_j$  değerleri Tablo 2’deki gibi elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Kriterlere ilişkin sıralamalar ve  $s_j$  değerleri

Sıra	KV <sub>1</sub>		KV <sub>2</sub>		KV <sub>3</sub>	
	$K_j$	$s_j$	$K_j$	$s_j$	$K_j$	$s_j$
1	$K_1$	-	$K_1$	-	$K_1$	-
2	$K_8$	0,90	$K_5$	0,80	$K_5$	0,85
3	$K_3$	0,85	$K_8$	0,80	$K_6$	0,75
4	$K_5$	0,80	$K_3$	0,90	$K_8$	0,90
5	$K_7$	0,90	$K_6$	0,80	$K_7$	0,80
6	$K_2$	0,80	$K_4$	0,70	$K_2$	0,60
7	$K_4$	0,85	$K_2$	0,90	$K_3$	0,65
8	$K_6$	0,75	$K_7$	0,90	$K_4$	0,40

**Tablo 3.** Kriter ağırlıkları ( $w_j$ )

	KV <sub>1</sub>	KV <sub>2</sub>	KV <sub>3</sub>	<b>Final</b>
	$w_j$	$w_j$	$w_j$	$w_j$
$K_1$	0,468	0,452	0,451	<b>0,457</b>
$K_2$	0,022	0,013	0,025	<b>0,020</b>
$K_3$	0,133	0,073	0,015	<b>0,074</b>
$K_4$	0,012	0,024	0,011	<b>0,016</b>
$K_5$	0,074	0,251	0,244	<b>0,189</b>
$K_6$	0,007	0,041	0,139	<b>0,062</b>
$K_7$	0,039	0,007	0,041	<b>0,029</b>
$K_8$	0,246	0,139	0,073	<b>0,153</b>

Son olarak, kriter ağırlıkları ( $w_j$ ) Tablo 3'teki gibi elde edilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde, uçak gövdesi için malzeme seçiminde en yüksek öneme sahip olan kriterin 0,457'lik değeri ile  $K_1$  yani 'çekme dayanımı' olduğu; en düşük öneme sahip olan kriterin ise 0,016'lık değeri ile  $K_4$  yani 'yüzde uzama' olduğu görülmektedir.

### 3.2. MULTIMOORA Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması (Ranking the Alternatives Using MULTIMOORA Method)

Oran Metodu, Referans Noktası Yaklaşımı ve Tam Çarpım Formu ile elde edilen sonuçlar ile baskınlık teorisine dikkate alınarak MULTIMOORA yöntemi ile elde edilen genel sıralama Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4 incelendiğinde, Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemine göre yolcu uçağı gövdesi için en uygun malzemenin  $A_1$ , yani CFRP olduğu;  $A_9$  (Ti-6Al-4V) ve  $A_2$  (GFRP)'nin de sırasıyla  $A_1$ 'i takip eden alternatifler olduğu görülmektedir. Tercih sıralamasında son sırada yer alan alternatif ise  $A_5$ , yani Al 5052-H32 olmuştur. Alternatiflerin genel sıralaması,  $A_1 > A_9 > A_2 > A_7 > A_3 > A_4 > A_6 > A_8 > A_5$  şeklinde gerçekleşmiştir.

**Tablo 4.** MULTIMOORA yöntemi ile alternatiflere ilişkin sıralama

	<i>Oran Metodu</i>	<i>Referans Noktası Yaklaşımı</i>	<i>Tam Çarpım Formu</i>	<b>MULTIMOORA</b>
<i>A<sub>1</sub></i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>9</i>	<b>1</b>
<i>A<sub>2</sub></i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>8</i>	<b>3</b>
<i>A<sub>3</sub></i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<b>5</b>
<i>A<sub>4</sub></i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<b>6</b>
<i>A<sub>5</sub></i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>5</i>	<b>9</b>
<i>A<sub>6</sub></i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>4</i>	<b>7</b>
<i>A<sub>7</sub></i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>2</i>	<b>4</b>
<i>A<sub>8</sub></i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<b>8</b>
<i>A<sub>9</sub></i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>6</i>	<b>2</b>

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemi ile yolcu uçağı gövdesi için alternatif malzemeler sıralanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle makine mühendislerinden oluşan üç kişilik uzman ekibin ortak görüşü doğrultusunda uçak gövdesinde kullanılacak malzeme alternatifleri ve bu malzemelerin sağlanması gereken özellikleri temsil eden kriterler belirlenmiştir. Ardından uzmanların ayrı ayrı görüşleri alınarak SWARA yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmıştır. Buna göre uçak gövdesi için malzeme seçiminde en yüksek öneme sahip olan kriterin K<sub>1</sub> yani ‘çekme dayanımı’, en düşük öneme sahip olan kriterin ise K<sub>4</sub> yani ‘yüzde uzama’ olduğu görülmüştür. Son aşamada ise kriter ağırlıkları doğrultusunda MULTIMOORA yöntemi ile alternatifler sıralanmıştır. Alternatifler arasından uçak gövdesi için en uygun ilk üç malzeme sırasıyla CFRP, Ti-6Al-4V ve GFRP olarak belirlenmiştir. Al 5052-H32, AZ31B ve Al 6061-T6 alaşımları ise son üç sırada yer almıştır.

Yolcu uçağı üretiminde gövde malzemesi olarak daha önceleri çoğunlukla Al kullanılırken, günümüzde giderek artan oranlarda kompozit malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar gerçek hayattaki uygulamalar ile kıyaslandığında birinci ve üçüncü sıradaki kompozit malzemelerin paralellik gösterdiği görülmektedir. İkinci sıradaki Ti ise mekanik özellikleri açısından oldukça iyi bir malzeme olmasına rağmen kompozit malzemelere göre ağır ve GFRP’ye göre ise oldukça pahalı olduğundan gövdenin genelinden ziyade daha küçük parçalarında kullanımının üreticiler tarafından uygun bulunduğu söylenebilir. Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemi ile elde edilen sıralama ile gerçek hayattaki uygulamalar arasındaki bu farklar aslında uzman ekip ile ticari kuruluşların görüş farklılıklarını da ortaya koymaktadır. Bu fark ticari kuruluşların, fayda yönlü kriterler açısından asgari dayanım şartlarını sağladıktan sonra kendileri için en önemli faktörlerden olan maliyet kriterine göre ekonomik açıdan rekabet edebilir bir ürün ortaya koyma düşüncesinden doğmaktadır. Ekonomik açıdan rekabet müşteri için hem satın alma maliyetini hem de yakıt tüketimi ve yedek parça maliyeti gibi işletim maliyetlerini kapsamaktadır. Dolayısıyla, üreticilerin asgari mekanik ve termal şartları sağladıktan sonra hafif ve uygun maliyetli malzemeleri daha çok tercih ettiği söylenebilir. Bu doğrultuda GFRP’nin, CFRP ve Ti-6Al-4V alaşımına göre uçak gövdesi seçiminde daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Son sıralarda yer alan AZ31B, Al 5052-H32 ve Al 6061-T6 alaşımlarının mekanik özellikleri incelendiğinde uzmanlar tarafından en önemli kriter olarak belirlenen çekme dayanımlarının diğer malzemeler göre oldukça düşük olduğu görülmektedir.

İleriki çalışmalar için farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca kriter sayısı artırılarak uçağın farklı parçaları için karşılaştırmalı analizler yapılabilir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Tabuchi, H. 'Worse than anyone expected': air travel emissions vastly outpace predictions. (2019). [www.nytimes.com/2019/09/19/climate/air-travel-emissions.html](http://www.nytimes.com/2019/09/19/climate/air-travel-emissions.html). (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [2] New global agreement will help curb pollution from aviation. (2016). [www.worldwildlife.org/stories/new-global-agreement-will-help-curb-pollution-from-aviation](http://www.worldwildlife.org/stories/new-global-agreement-will-help-curb-pollution-from-aviation). (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [3] Reducing emissions from aviation. (2017). [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en). (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [4] Steinegger, R. Fuel economy as function of weight and distance. Zürcher Fachhochschule, (1-11), (2017).
- [5] Kryemadhi, W. How many miles do airplanes fly in the world each year? (2017). <https://www.quora.com/How-many-miles-do-airplanes-fly-in-the-world-each-year> (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [6] Flight length. (2020). [https://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_length](https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_length) (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [7] Farokhi, S. (2020). Future propulsion systems and energy sources in sustainable aviation. John Wiley & Sons, 228-229.
- [8] Singh, P., Pungotra, H., Kalsi, N. S. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(8)(8971-8982), (2017).
- [9] Jun, L. I. U., Yulong, L. I., Xiancheng, Y. U., Xiaosheng, G. A. O., Zongxing, L. I. U. Design of aircraft structures against threat of bird strikes. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7)(1535-1558), (2018).
- [10] Mousavi-Nasab, S. H., Sotoudeh-Anvari, A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. *Materials & Design*, 121(237-253), (2017).
- [11] Çalış Boyacı, A. selection of eco-friendly cities in Turkey via a hybrid hesitant fuzzy decision making approach. *Applied Soft Computing*, 89(106090), (2020).
- [12] Shaikh, A., Singh, A., Ghose, D., Shabbiruddin. analysis and selection of optimum material to improvise braking system in automobiles using integrated fuzzy-COPRAS methodology. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, (1-9), (2020).
- [13] Pu, Y., Ma, F., Han, L., Wang, G. Material selection of green design processes for car body via considering environment property. *Mathematical Problems in Engineering*, (1-8), (2020).
- [14] Catibog, J. M. R., Lazarte, A. M. B., Magdaluyo Jr, E. R. Materials selection methods in the design of monocoque for a fuel efficient concept vehicle. *Procedia CIRP*, 84(998-1002), (2019).
- [15] Ghose, D., Pradhan, S., Tamuli, P., Shabbiruddin. Optimal material for solar electric vehicle application using an integrated fuzzy-COPRAS model. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, (1-20), (2019).
- [16] Pu, Y., Ma, F., Zhang, J., Yang, M. Optimal lightweight material selection for automobile applications considering multi-perspective indices. *Ieee Access*, 6(8591-8598), (2018).
- [17] Dozic, S. Kalic, M.. Comparison of two MCDM methodologies in aircraft type selection problem. *Transportation Research Procedia*, 10(910-919), (2015).

- [18] Dozic, S., Lutovac, T., Kalic, M. Fuzzy AHP approach to passenger aircraft type selection. *Journal of Air Transport Management*, 68(165-175), (2018).
- [19] Zolfani, S. H., Aghdaie, M. H., Derakhti, A., Zavadskas, E. K., Varzandeh, M. H. M. Decision making on business issues with foresight perspective; An application of new hybrid MCDM model in shopping mall locating. *Expert Systems with Applications*, 40(17)(7111-7121), (2013).
- [20] Stanujkic, D., Karabasevic, D., Zavadskas, E. K. A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 26(2)(181-187), (2015).
- [21] Karabašević, D., Stanujkić, D., Urošević, S. The MCDM model for personnel selection based on SWARA and ARAS methods. *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 20(77)(43-52), (2015).
- [22] Çakır, E., Kutlu Karabıyık, B. Bütünleşik SWARA-COPRAS yöntemi kullanarak bulut depolama hizmet sağlayıcılarının değerlendirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(4)(417-434), (2017).
- [23] Yurdoğlu, H., Kundakcı, N. SWARA ve WASPAS yöntemleri ile sunucu seçimi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20(38)(253-269), (2017).
- [24] Çakır, E. Bütünleşik SWARA ve EDAS yöntemi kullanarak fitness merkezlerinin değerlendirilmesi: Örnek bir uygulama. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(3)(1907-1923), (2018).
- [25] Bakır, M. 2019. SWARA ve MABAC yöntemleri ile havayolu işletmelerinde ewom' a dayalı memnuniyet düzeyinin analizi. *İzmir İktisat Dergisi*, 34(1)(51-66), (2019).
- [26] Durmaz, K. İ., Gencer, C. Tedarikçi seçiminde entegre lojistik destek yaklaşımı ve işletme uygulaması: SWARA-SMAA-2. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2)(828-841), (2019).
- [27] Durmaz, K. İ., Çalış Boyacı, A., Gencer, C. Türkiye'deki düzey-1 bölgelerinin eğitim göstergeleri açısından çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(1)(13-25), (2020).
- [28] Durmaz, K. İ., Gencer, C. A New plugin based on JSMAA: SWARA-JSMAA and aerobatic aircraft selection. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3)(1487-1498), (2020).
- [29] Ghenai, C., Albawab, M., Bettayeb, M. Sustainability indicators for renewable energy systems using multi-criteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. *Renewable Energy*, 146(580-597), (2020).
- [30] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E.K. Project management by MULTIMOORA as an Instrument for transition economies. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(1)(5-24), (2010).
- [31] Baležentis, A., Baležentis, T., Brauers, W. K. M. Personnel selection based on computing with words and fuzzy MULTIMOORA. *Expert Systems with Applications*, 39(7961-7967), (2012).
- [32] Baležentis, T., Zeng, S. Group multi-criteria decision making based upon interval-valued fuzzy numbers: An extension of the MULTIMOORA method. *Expert Systems with Applications*, 40(543-550), (2013).
- [33] Özçelik, G., Aydoğan, E. K., Gencer, C. A hybrid moora-fuzzy algorithm for special education and rehabilitation center selection. *Journal of Military and Information Science*, 2(3)(53-62), (2014).
- [34] Datta, S., Sahu, N., Mahapatra, S. Robot selection based on grey-MULTIMOORA approach. *Grey Systems: Theory and Application*, 3(2)(201-232), (2013).

- [35] Altuntaş, S., Dereli, T., Yılmaz, M.K. Evaluation of excavator technologies: application of data fusion based MULTIMOORA methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(8)(977-997), (2015).
- [36] Hafezalkotob, A., Hafezalkotob, A. Comprehensive MULTIMOORA method with target-based attributes and integrated significant coefficients for materials selection in biomedical applications. *Materials and Design*, 87(949-959), (2015).
- [37] Türe, H., Koçak, D., Doğan, S. MULTIMOORA yöntemi ile ülke riski değerlendirmesi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3)(824-844), (2016).
- [38] Çalış, A., Özçelik, G., Gencer, C. Türkiye'deki imalat sanayi sektörlerinin PROMETHEE MULTIMOORA ve SMAA-2 yöntemleriyle sıralanması. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(2)(28-44), (2016).
- [39] Kabak, M., Erbaş, M., Çetinkaya, C., Özceylan, E. A GIS-based MCDM approach for the evaluation of bike-share stations. *Journal of Cleaner Production*, 201(49-60), (2018).
- [40] Tian, Z.P., Wang, J.Q., Wang, J., Zhang, H.Y. A multi-phase QFD-based hybrid fuzzy MCDM approach for performance evaluation: a case of smart bike-sharing programs in Changsha. *Journal of Cleaner Production*, 171(1068-1083), (2018).
- [41] Dahooie, J.H., Zavadskas, E.K., Firoozfar, H.R., Vanaki, A.S., Mohammadi, N., Brauers, W.K.M. An improved fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria decision making based on objective weighting method (CCSD) and its application to technological forecasting method selection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79(114-128), (2019).
- [42] Rahimi, S., Hafezalkotob, A., Monavari, S.M., Hafezalkotob, A., Rahimi, R. Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach: Fuzzy group BWM-MULTIMOORA-GIS. *Journal of Cleaner Production*, 248(11986), (2020).
- [43] Keršulienė, V., Zavadskas, E.K., Turskis, Z. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA), *Journal of Business Economics and Management*, 11(2)(243-258), (2010).
- [44] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control Cybern.* 35(2)(445-469), (2006).
- [45] Baležentis, A., Baležentis, T., Valkauskas, R. Evaluating situation of lithuania in the european union: structural indicators and MULTIMOORA method. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(4)(578-602), (2010).
- [46] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K. Multi-objective decision making with a large number of objectives. An application for Europe 2020. *International Journal of Operations Research*, 10(2)(67-79), (2013).
- [47] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K. 2011. MULTIMOORA optimization used to decide on a bank loan to buy property. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(1)(174-188), (2011).
- [48] Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier, Woodhead, Cambridge, 5.
- [49] Zhang, X., Chen, Y., Hu, J. Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 97(22-34), (2018).
- [50] Khanna, N., Davim, J. P. Design-of-experiments application in machining titanium alloys for aerospace structural components. *Measurement*, 61(280-290), (2015).



- [51] Calado, E. A., Leite, M., Silva, A. Selecting composite materials considering cost and environmental impact in the early phases of aircraft structure design. *Journal of Cleaner Production*, 186(113-122), (2018).
- [52] Huda, Z., Edi, P. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review. *Materials & Design*, 46(552-560), (2013).
- [53] Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 9). New York: Wiley.
- [54] Jones, D. R., Ashby, M. F. (2018). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design*. Butterworth-Heinemann.

## Experimental Measurement of Different Pipe Material Type of Time-dependent Pressure Drop, Numerical Analysis and Classification Using Anova Analysis

 Ahmet B. DEMİRPOLAT<sup>1,\*</sup>  Erdem ALIÇ<sup>2</sup> 
<sup>1\*</sup>Malatya Turgut Ozal University, Vocational school of Arapgir, 44800, Arapgir/MALATYA

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Vocational school of Andırın, 46410, Andırın/KAHRAMANMARAS

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 20/07/2020

Revision: 12/09/2020

Accepted: 21/09/2020

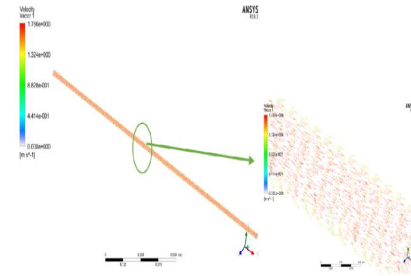
#### Highlights

- Numerical Analysis
- Anova statics
- Pressure drop

#### Keywords

 Anova  
 ANSYS FLUENT 18.1.  
 Pipes  
 Pressure drop

In this study, the pressure changes in the internal flow in pipes of different material types were investigated experimentally and numerically. For this study, 2000 mm long pipes made of 5 different materials were used. Different Reynolds numbers ( $Re = 45832,12- 51276,56$ ) were obtained by changing the fluid flow rate.



**Figure A.** The velocity vector for pipe

**Purpose:** The aim of this study is to separate the pressure drop of pipes made of different materials in flows with different  $Re$  numbers from each other with ANOVA statistical program. Due to experimental devices, it is included in the numerical analysis made to verify the set of experiments.

**Theory and Methods:** The 3D model of the experimental setup was created in SOLIDWORKS 2018, and the experimental results were controlled by using ANSYS FLUENT 18.1 numerical analysis program. The suitability of flow rate and pressure measurement ranges, the accuracy of the classification were used with the ANOVA technique analysis method.

**Results:** As a result, the accuracy of the experiment set was ensured. Pressure drops were calculated for 2m pipe length of 5 different types of pipes. Pressure change contours in the pipe are given. Velocity change vectors in the pipe are given in 3D. The analysis of the data obtained with the Anova statistical program was carried out in order to show the effect of the design parameters that affect the characteristics of the system.

**Conclusion:** Experimental data obtained for aluminum smooth pipes are modeled with less than 1% error by numerical analysis. . As a result of, appropriate flow variation, pipe diameter ranges and pipe material classifications are presented as a contribution to the literature. It has been observed that pipe materials can be classified as hard metals (iron, galvanized steel, etc.), soft metals (copper, aluminum, etc.) and plastic (PPRC, etc.).



## Malzeme Cinsi Farklı Boruların Zamana Bağlı Basınç Düşümlerinin Deneysel Ölçülmesi, Sayısal Analizi Ve Anova Analizi Kullanılarak Sınıflandırılması

Ahmet B. DEMİRPOLAT<sup>1\*</sup> Erdem ALIÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Arapgir Meslek Yüksekokulu, 44800, Arapgir/MALATYA

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Andırın Meslek Yüksekokulu, 46410, Andırın/KAHRAMANMARAŞ

### Öz

Bu çalışmada malzeme cinsi farklı borularda gerçekleşen iç akıştaki basınç değişimleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada için 2000 mm uzunluğunda 5 farklı malzemeden üretilmiş borular kullanılmıştır. Akışkan debisi değiştirilerek farklı Reynolds sayıları ( $Re = 45832,12- 51276,56$ ) elde edilmiştir. Reynolds sayısının değişimi ile boru boyunca basınç değişimi deneysel olarak gözlemlenmiştir. Akışın debi değişim aralıkları, sabit hacimli bir su deposunun dolun süreleri değiştirilerek ayarlanmıştır. Kurulan deney setinin 3B modeli SOLIDWORKS 2018'de oluşturulmuş olup sayısal modeli için ANSYS FLUENT 18.1 sayısal analiz programı kullanılmıştır. Alüminyum pürüzsüz boru için elde edilen deneysel veriler, sayısal analiz ile %1'den daha az hata ile modellenmiştir. Deney seti sayısal analiz ile doğrulanmıştır. Bu deney seti üzerine diğer borular monte edilerek boru boyunca ve zamana bağlı basınç değişimleri deneysel olarak gözlemlenmiştir. Akış hızı ve basınç ölçüm aralıklarının uygunluğu, sınıflandırılmanın doğruluğu ANOVA tekniği analiz metodu ile desteklenmiştir. Sonuç olarak, uygun akış değişimi, boru çapı aralıkları ve boru malzemesi sınıflandırmaları literatüre katkı olarak sunulmuştur. Boru malzemeleri sert metaller (demir, galvanizli çelik vb.), yumuşak metaller (bakır, alüminyum vb.) ve plastik (PPRC vb.) olarak sınıflandırılabilceği gözlemlenmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/07/2020  
Düzeltilme: 12/09/2020  
Kabul: 21/09/2020

### Anahtar Kelimeler

Anova  
ANSYS FLUENT 18.1  
Basınç Düşüşü  
Borular

### Keywords

Anova  
ANSYS FLUENT 18.1  
Pipes  
Pressure drop

## Experimental Measurement of Different Pipe Material Type of Time-dependent Pressure Drop, Numerical Analysis and Classification Using Anova Analysis

### Abstract

In this study, the pressure changes in the internal flow in pipes of different material types were investigated experimentally and numerically. For this study, 2000 mm long pipes made of 5 different materials were used. Different Reynolds numbers ( $Re = 45832,12- 51276,56$ ) were obtained by changing the fluid flow rate. Pressure change along the pipe with the change of the Reynolds number was experimentally observed. The flow rate change intervals of the flow are adjusted by changing the filling times of a fixed volume water tank. The 3D model of the experiment set was created in SOLIDWORKS 2018 and ANSYS FLUENT 18.1 numerical analysis program was used for the numerical model. Experimental data obtained for aluminum smooth pipes are modeled with less than 1% error by numerical analysis. The experiment set was verified by numerical analysis. Other pipes were mounted on this test set and pressure changes along the pipe and with time were experimentally observed. The suitability of flow rate and pressure measurement ranges and the accuracy of classification were supported by the ANOVA technique analysis method. As a result of, appropriate flow variation, pipe diameter ranges and pipe material classifications are presented as a contribution to the literature. It has been observed that pipe materials can be classified as hard metals (iron, galvanized steel, etc.), soft metals (copper, aluminum, etc.) and plastic (PPRC, etc.).

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Boru iç akışında gerçekleştirilen sıvı akışı genellikle ısıtma ve sıvı dağıtım şebekelerinde kullanılır. Bu tür uygulamalarda, sıvı genellikle bir pompa tarafından bir akış bölgesine akmaya zorlanır. Boru akışındaki basınç düşüşü ve yük kaybı ile doğrudan ilişkili olan sürtünmeye özellikle dikkat etmek gerekir. Bu noktada, dış faktörler sürtünmenin piyasaya çıkmasına neden olur. Bu dış faktörlerden biri boru pürüzlülüğüdür. Literatürde bu konu hakkında çalışmalar birkaç başlık altında toplanabilir. Bunlar sürtünme kayıplarının sebep olduğu basınç düşüşü ve borunun geometrik yapısından kaynaklanan basınç düşüşleri olarak iki gruba ayrılabilir. Bu çalışmada, basınç düşüşü, pürüzlülük, boru çapı, boru malzemesi ve akış süresine göre istatistiksel olarak anlamlı akış hızlarını hesaplamak için SPSS programı kullanılarak bir ANOVA analizi yapılmıştır.

Boru içi akışlar üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların; en önemlilerinden biri, G. Hagen (1797-1884) ve J. Poiseuille (1799-1869) tarafından geliştirilen, Hagen-Poiseuille akışı adı verilen, basınç düşüşü ile akış arasındaki ilişkiyi veren; çalışma sonucu elde edilmiş olan denklemdir [1-2].

Cyril F. Colebrook, 1939'da pürüzsüz, kaba borular ve türbülanslı akışlar için mevcut verileri birleştirerek Colebrook denklemini geliştirmiştir. 1942'de Hunter Rouse ve Lewis F. Moody, iki yıl sonra Moody diyagramı olarak bilinen sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki ilişkiyi çizmiştir. Moody diyagramı ve Colebrook denklemi, deneysel hataların büyüklüğü nedeniyle sadece % 15 sapma ile kullanılabilir [3-4].

Bhatti ve Shah [5] ve Kaysa ve Crawford [6] sıvı akışlarında hidrodinamik geçiş uzunluğunu incelemişlerdir. Basınç kaybı ve sürtünme faktörünü bulmak için yapılan bu çalışmaları genellikle yapay olarak pürüzlendirilmiş borular üzerinde gerçekleştirmişlerdir.

Fang ve ark. çalışmalarında türbülanslı bir boru akışındaki sürtünme faktörünün korelasyonlarını; kritik basınç altında detaylı bir şekilde incelemiş olup adyabatik süper kritik türbülanslı boru akışı için sürtünme faktörünün korelasyonunu elde etmişlerdir [7].

Abushammala ve ark. incelemelerinde helisel borularda, özellikle de yüksek derecede kavisli olanlarda; laminer akış da sürtünme faktörünü belirlemek için HAD simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Sayısal sonuçların deneysel olarak onaylanması için, 3B baskı ile yüksek derecede kavisli bir sarmal yapmışlardır. Mevcut korelasyonların, yüksek derecede eğimli sarmallarda sürtünme faktörünün tahmininde başarısız olduğu kanıtlanmış olup yeni bir korelasyon önermişlerdir. Deneysel basınç düşüşü ölçümleri ve önerilen korelasyon tahminleri arasında mükemmel bir uyum elde etmişlerdir [8].

Avcı ve ark. çalışmalarında, pürüzsüz ve pürüzlü yüzeyler için tüm Reynolds sayı aralıklarında geçerli olan tek bir açık denklemin türetilmesi için incelemelerde bulunmuşlardır. Laminer ve türbülanslı akışlardaki sürtünme faktörü denklemlerini, geçiş bölgesi için geliştirilen metod sayesinde tek bir denkleme dönüştürmüşlerdir. Önerilen denklemin sonuçları, mevcut deneysel verilerle ve sırasıyla pürüzsüz ve pürüzlü yüzeyler için Colebrook denkleminde ki veriler karşılaştırılmıştır. Tüm Reynolds sayı aralıkları boyunca Colebrook denklemi kullanılarak ulaşılan sonuçlar ile elde edilen deneysel veriler arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Çalışmalarında hata oranı, pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylerde, laminar ve türbülanslı akışlar için sırasıyla  $\pm\% 2$  ve  $\pm\% 10$ 'dur [9].

Heralda ve ark. incelemelerinde, Pozitron Emisyon Partikül Takibi (PEPT) metodunu deneysel sıvı akışlarında, Lagrange yöntemiyle veri toplayabilmek için; Simüle edilmiş bir boru akışlı PEPT ölçümünden çalışmalarında faydalanmışlardır [10].

Pereira ve ark. sarmal bir boru sisteminde; sıvının akışını incelemek için, sargılı bakır boru ile gerçek sarmal boru sistemine benzer bir deney ünitesi oluşturmuşlardır. Boru uzunluğu boyunca basınç ve sıcaklık değerlerinin değişimini gözlemleyebilmek için düzeneğe basınç vericileri ve termocouple monte edilmiş olup bu cihazlar yardımıyla elde edilen akış hızı ve basınç düşüşü değerleri sayesinde; laminer ve türbülans akış rejiminde ki sürtünme faktörü korelasyonlarını, basınç düşüşünde eğriliğin ve boru uzunluğunun akışa etkisini incelemişlerdir. Sarmal boru sistemindeki basınç düşüşünü tahmin etmek için bir metodoloji önermişler; deneysel ve hesaplanan basınç düşüş değerleri arasındaki hata oranını % 5'in altında olduğunu gözlemlemişlerdir [11].

Naidek ve ark. Çalışmalarında Oluklu yatay borularda; sıvı-gaz akışlarındaki basınç düşüşünü engellemeye yönelik bir oluk geometrisi elde etmişler ve akış giriş verilerini kullanarak bir korelasyon oluşturmuşlar; Modellerindeki tahminlerinin, deneysel verilerle karşılaştırmaları sonucu korelasyonlarının  $\pm\%7$  doğruluk gösterdiği sonucuna varmışlardır [12].

Yanga ve ark. yüksek basınç altında dikey bir borudaki yukarı yönlü yağ-su akış paternlerini incelemek için deneysel ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında, yağ-su; iki fazlı akışkan davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuşlardır [13].

Arslan ve Yaman çalışmalarında,  $30^\circ$  eğimli bir boruda termal olarak gelişmekte olan akış için, farklı boylarda sarmal şerit kullanımının; ısı ve hidrodinamik performansa etkisini incelemişlerdir. Şerit kullanılarak yapılan deneyler sonucu elde edilen; ısı taşınım katsayısı, basınç kaybına bağlı olarak elde edilen Nusselt sayılarını ve sürtünme faktörlerini tespit edip, içi boş şeritsiz boruda elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Nusselt sayısının sürtünme faktörüne oranı şeklinde tanımlanan performans iyileştirme faktörü, USŞ için 0,8–2,0, KŞŞ için 1,1–1,5 aralığında tespit etmişlerdir. Buna ek olarak Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için deneysel bağıntılar geliştirmişlerdir. Nusselt sayısı için geliştirilen bağıntı; deney verilerini  $\%14.6$  sapma ile tahmin ederken, sürtünme faktörü için bu değer  $\%11.9$  olarak elde edilmiştir[14].

Gül ve Evin çalışmalarında; belirli genlik ve frekans değerinde salınım yapan silindirik borularda, ısı transferi ve basınç kaybı karakteristiklerini incelemişlerdir. Genlik ve frekansın; ısı transferi ve basınç kaybı katsayısı üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir[15].

Lyu ve ark. çalışmalarında, re-sirküasyonlu boru akışına etki eden faktörleri kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Önce, dağılım başlıkları olan ve olmayan sistemlerin performanslarını değerlendirmek için deney testleri yapmışlardır. Daha sonra termal ve akış özellikleri CFD analizi kullanılarak sistemlerin karşılaştırmışlardır. Ayrıca bağlantı borusu boyutlarının etkilerini, onaylanmış bir FORTRAN programı kullanarak incelemişlerdir[16].

Shah ve ark. üç boyutlu HAD modellerini kullanarak su ve hava için analizler gerçekleştirmişlerdir. Çözüm metodolojisi olarak standart türbülanslı model, yarı örtülü basınç bağlantılı denklem (SIMPLE) algoritması ve ikinci dereceden ayırma yöntemlerini kullanmışlardır. Analiz sonuçları ile deneysel veriler arasında iyi bir eşleşme olduğunu göstermişlerdir [17].

Roul ve Dash orifis plaka yüzeyinden; yukarı ve aşağı yönlü akışta, sabit hız ve sabit basınç altında akış gerçekleştiği sürece yakınsama kriterlerinin ( $10^{-3}$ ) gerçek çözümü temsil etmek için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır. Analiz modellerini; basınç düşüşü, boşluk fraksiyonu ve kayma oranını (tek ve iki fazlı) orifis plakasının kalınlığı ile ilişkilendirmek için gerçekleştirmişlerdir [18].

Yadav ve Bhagoria çalışmalarında, işlemci kapasitesinden ve hesaplama süresinden tasarruf etmek için 2B gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında dairesel kesitli oyuklara sahip, güneş enerjisi ile çalışan hava ısıtıcı (2B dikdörtgen kesitli) kanalında; sıvı akışı ve ısı transfer karakteristiklerinin davranışlarını araştırmalarında incelemişlerdir. Sonuç olarak eşit pompalama gücünde; bağıl en/boy oranı ( $P / e$ ) ve Reynolds sayısının ( $Re$ ); Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Termo-hidrolik performans parametresi açısından en iyi kaburga konfigürasyonunu belirlemişlerdir [19].

Şahin ve ark. iç içe borulu ısı değiştiricisinde RNG k- $\epsilon$  türbülans modelini çalışmışlardır. Çalışmalarında Reynolds ( $Re$ ) aralığı 3000-18000 arasında değişmektedir. Üç ayrı duvar fonksiyonuna bağlı sayısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Bunlardan RNG-Standard duvar fonksiyonu modelinin, diğer modellere göre; deneysel sonuçlara daha iyi yaklaştığını belirtmişlerdir [20].

Karayeyen ve İlbaş sayısal çalışmalarında; oksitleyiciye su buharı ilavesi gerçekleştirilebilen kok fırınında; bu durumun yanma davranışlarına etkisini modellemişlerdir. Sayısal analiz için ANSYS FLUENT programını kullanmışlardır. Analizler sonucunda oksitleyici su buharının; kok fırınının sıcaklığını düşürdüğünü ifade etmişlerdir [21].

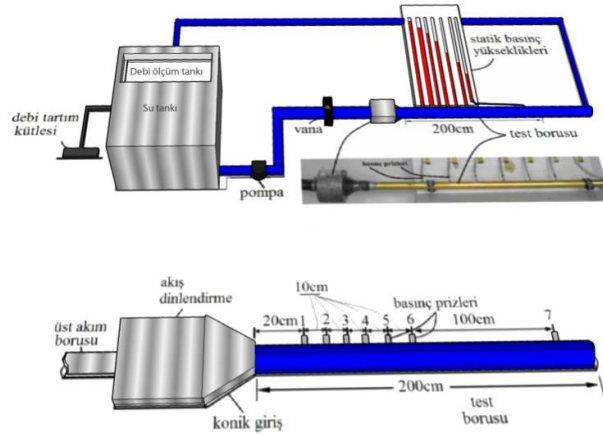
Bu çalışmada, tüm deneyler yapılmadan önce alüminyum pürüzsüz boru için oluşturulan deney düzeneğinin sayısal analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Deney düzeneğinin 3B modeli SOLIDWORKS 2018'de oluşturulmuş olup, ANSYS FLUENT 18.1 sayısal analiz programı kullanılarak deneysel olarak elde edilen sonuçların kontrolü sağlanmıştır. Verilerin

kontrolü aşamasından sonra deney düzeneğine farklı boru tipleri monte edilerek deneylere devam edilmiştir. Bu çalışmanın literatüre göre özgün yanı SPSS programında yer ANOVA analizi metodu ve ANSYS FLUENT 18.1 kullanılarak deneysel kurulum sonucu elde edilen sınıflandırmanın uygunluğunun araştırılması olarak göze çarpmaktadır. Boruların sınıflandırılmasında hassas bir sonuç elde edildiğini gösterilmek hedeflenmiş olup grafiklerin incelenmesi sonucu deneyde kullanılan boru tipleri kendi aralarında sınıflandırıldıktan sonra sınıflandırılmanın doğruluğunun tespiti yönünden; basınç düşüşü, pürüzlülük, boru çapı, boru malzemesi ve sıvının akış süresine göre istatistiksel olarak anlamlı akış hızlarını hesaplamak kaydıyla SPSS programında bir ANOVA analizi yapılarak sınıflandırmanın uygunluğu test edilmiş, literature uygun akış değişimi, boru çapı aralıkları ve boru malzemesi sınıflandırılmaları kazandırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1 Deneysel Metot (Experimental Method)

Deneyleri gerçekleştirmek için kullanılan akışkan sudur. Görünürlük için suya kırmızı boya eklenmiştir. Demir, Plastik (PPRC), bakır, alüminyum ve galvanizli çelik olmak üzere deneysel çalışma için farklı pürüzlülükler sahip 5 boru seçilmiştir. Boruların çapları 20,5 mm'den 27,75 mm'ye değişmektedir. Akış hızı aralığı 0,92879257 m<sup>3</sup> / s ile 0,000247525 m<sup>3</sup> / s arasında değiştirilmiştir. Boru uzunlukları seçilirken hidrodinamik geçiş uzunluğu ve tam gelişmiş akış aralığı dikkate alınmıştır. Ölçüm portları boruların giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir. Borunun giriş kısmında borulardaki hidrodinamik geçiş aralığını incelemek için basınç prizleri dar aralıklarla yerleştirilmiştir. Akış hızı bir hidrolik tankla ölçüldü ve statik basınç değerleri bir kamera tarafından 105 saniyelik bir zaman aralığı boyunca kaydedilmiştir. Basınç değerleri daha sonra görüntü işleme tekniği ile kaydedilen videolardan düzenlenmiştir. Şekil 1' deki deney düzeneğinde deneyler 5 farklı boru cinsi için tekrarlanmıştır.



Şekil 1. Deneysel çalışma

Deney esnasında hacimsel debi ve statik basınç ölçümleri yapılmıştır. Hacimsel debi ölçüm sonucu elde edilen verilerle Reynolds sayısı, statik basınç ölçümü sonucu elde edilen veriler ile çeper kayma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada belirsizlik analizi gerçekleştirmek için Kline ve McClintock tarafından ifade edilen metot (Eşitlik 1) kullanılmıştır [22]. Eşitlik 1.'de z belirsizlik özellikleri, W belirsizlik değerini, n ise belirsizlik oluşumuna sebep olan parametre adedini ifade etmektedir. Bu çalışma için hesaplanan belirsizlik analizi Tablo 1'de verilmiştir.

$$W_x = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial z}{\partial x_n}\right)^2} \cdot \bar{z}^{0,5}$$

**Tablo 1. Belirsizlik Analizi**

<b>Belirsizliğin Sebebi</b>	<b>Belirsizlik Değeri (%)</b>
Kütle ve zaman ölçümlerindeki belirsizlik	%1,1
Boru boyundaki farklılıklardan kaynaklanan belirsizlik	%1
Boru çapındaki farklılıklardan kaynaklanan belirsizlik	%1
Reynolds sayısındaki belirsizlik	%2,7
Basınç Kaybı Ölçümlerinde	%3,2
Fiziksel Özelliklerin Belirsizliği (Viskozite ve Yoğunluk)	%1
Sürtünme faktöründeki belirsizlik	%7,4

## 2.2 Sayısal Analiz (Numerical Analysis)

Bu çalışmada 3B modeli SOLIDWORKS 2018 oluşturulmuştur. Çözüm için ANSYS FLUENT 18.1 sayısal analiz programı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde çözüm ağ yapısının kalitesinin, analizin doğruluğuna etkisi bir çok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır[23].



**Şekil 2. 3B Alüminyum boru modeli**

İç akış problemlerinde çözüm ağ yapısında duvar  $y^+$  sayısı önemlidir. Duvar civarında akışta duvar boyunca bir sınır tabaka oluşumu gözlemlenir. Sayısal analizde bu sınır tabaka duvar fonksiyonu denilen bir eşitlikle hesaplanır. Bu fonksiyon yüksek Reynolds sayılı akışlarda çözüm süresini ve çözüm için gerekli eleman sayısının optimum olarak kurulmasını sağlar. Duvar etrafındaki akış bölgesi genel olarak 3 katmana ayrılır. Bunlar, viskoz tabaka ( $0 < y^+ < 5$ ), Ara tabaka ( $5 < y^+ < 30$ ) ve tam türbülanslı tabakadır ( $y^+ > 30$ ). Burada  $y^+$  boyutsuzdur. Aşağıda yer alan eşitlikler yardımı ile elde edilir.

$$y^+ = \frac{r u_t y}{m}$$

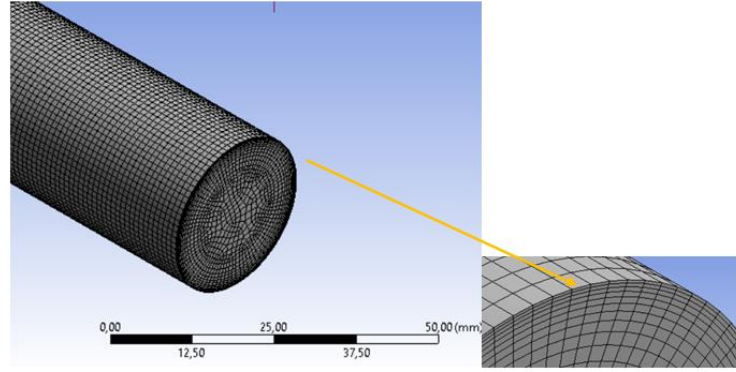
2

Burada  $U_t$

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{r}}$$

3

$U_t$  sürtünme hızıdır ve  $\tau_w$  ise duvardaki gerilmeyi ifade etmektedir[24,25]. Seçilen türbülans modeline göre akışın duvar  $y^+$  değeri hesaplanmalı, çözüm ağ yapısı ve ilk katman kalınlığı buna göre belirlenmelidir. Bu analizde çözülen tüm modellerin Duvar  $y^+$  değeri 11,4 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada türbülanslı akış için  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bu çözüm metodu için birçok araştırmacı duvar  $y^+$  değerinin 10-30 arası alınabileceğini belirtmektedir[26,27]. Bu çalışmada da 4 farklı çözüm ağ yapısı ile analiz gerçekleştirilmiş ve en uygun ağ yapısı AG\_2 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. Çözüm ağ yapısı

Gerçek bir olayın belirli kabuller altında sayısal hesaplarla ifade edilmesi için doğru başlangıç ve sınır şartı tanımlaması gerekmektedir. Bu çalışmada Şekil 3’ de yer alan modelde başlangıç hız girişi şartı olarak  $V=1,6425$  m/s hız tanımlanmıştır. Giriş akışkan sıcaklığı ( $T_{giriş}=\text{sabit}$ ) sabittir. Çıkış sınır şartı olarak  $P= 4418$  Pa tanımlanmıştır. Bu değer deney borusu üzerinde yer alan yedinci basınç ölçüm noktasından ( $P_7$ ) elde edilen deneysel değeridir. Giriş ve çıkış yüzeyler hariç kalan tüm yüzeylere duvar sınır şartı tanımlanmıştır. Duvar tanımlı yüzey için diğer sınır şartları ANSYS FLUENT 18.1 ‘in varsayılan değerleri olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Ağ yapısı analizi

Model	Maks. Eleman Boyutu [mm]	Min. Eleman Boyutu [mm]	Min. Ortogonal Kalite	Maks.Çarpıklık	Eleman sayısı
AĞ_1	0,75mm	0,01 mm	0,72	0,52	4456922
AĞ_2	1 mm	0,01 mm	0,84	0,55	2376600
AĞ_3	1,5mm	0,01 mm	0,84	0,54	980910
AĞ_4	2mm	0,01 mm	0,89	0,41	573750

Süreklilik denkleminin diferansiyel ifadesi Eş.4’te verilmiştir[28].

$$\frac{\partial}{\partial t} (r \vec{v}) + \tilde{N} \times (r \vec{v}) = S_m \quad 4$$

Ataletsel bir referans çerçevesinde momentumun korunumu ifadesi Eş. 5’te verilmiştir [29].

$$\frac{\partial}{\partial t} (r \vec{v}) + \tilde{N} \times (r \vec{v}) = -\tilde{N} p + \tilde{N} \times (\vec{t}) + r \vec{g} + \vec{F} \quad 5$$

Bu çalışmada k-ε transport denklemleri kullanılmıştır. İki eşitlik içere türbülans modelleri arasında kolay çözülebilirliği ve pek çok akış analizinde kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesinden dolayı sıklıkla tercih edilen yarı ampirik bir ifadedir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjinin dağılımı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümü ve türbülans viskozitesinin (μ) hesabını içerir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (r k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (r k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - r e - Y_M + S_k \quad 6$$



$$\frac{\rho}{\rho} (r e) + \frac{\rho}{\rho} (r e u_j) = \frac{\rho}{\rho} \left[ \left( m + \frac{m_t}{s_e} \right) \frac{\rho}{\rho} \frac{e}{x_j} \right] + r C_1 S_e - r C_2 \frac{e^2}{k + \sqrt{ve}} + C_{1e} \frac{e}{k} C_{3e} G_b + S_e \quad 7$$

$$C_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{h}{h + 5}, \frac{\dot{u}}{\dot{u}_0} \right\}, \quad h = S \frac{k}{e}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad 8$$

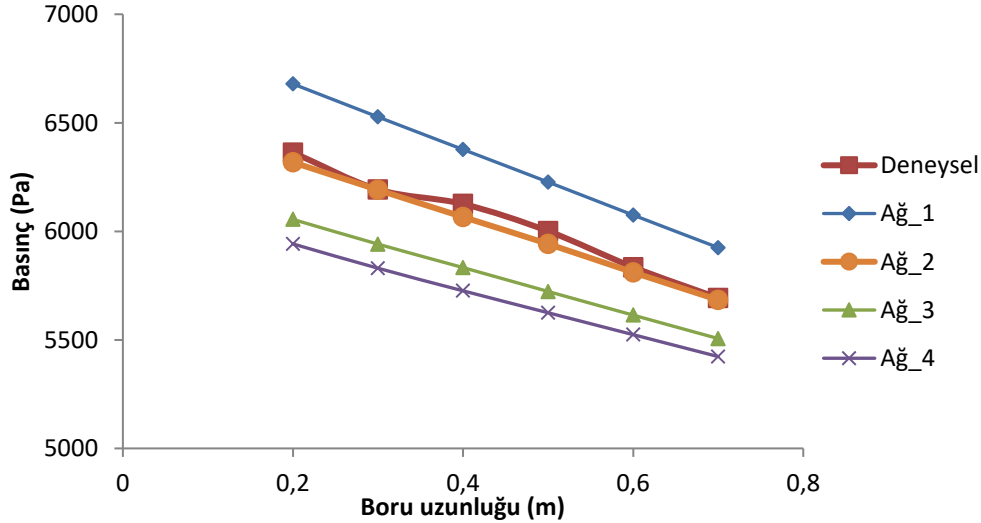
$$(C_{1e} = 1.44), (C_2 = 1.9), (s_k = 1.0), (s_e = 1.2) \quad 9$$

Yukarıdaki denklemlerde  $G_k$  ortalama hız gradyanlarının türbülans üretimini,  $G_b$  kaldırma kuvvetlerinin sebep olduğu türbülans kinetik enerji üretimini,  $Y_M$  sıkıştırılmaz türbülanslı akışta dalgalı dilatasyonun toplam yayılma hızına katkısını temsil eder. Burada  $C_{1e}$  ve  $C_2$  sabittir. Sırasıyla  $\sigma_k$  ve  $\sigma_e$  türbülanslı akışta Prandtl sayısı.  $S_k$  ve  $S_e$  kullanıcı tanımlı parametredir[29].

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada yapılan deneylerde Reynolds sayısı, oda sıcaklığında ki (27 °C) sıcaklıkta bulunan suyun özellikleri referans alınarak Eş. 10 yardımı ile hesaplanmıştır. Denklem 10'da  $V_{ort}$  ortalama hız değeri (m/s),  $\rho$  yoğunluk değeri (kg/m<sup>3</sup>),  $D$  boru çapı değeri (m) ve  $\mu$  (Pa.s) dinamik viskozite değerini temsil etmektedir.

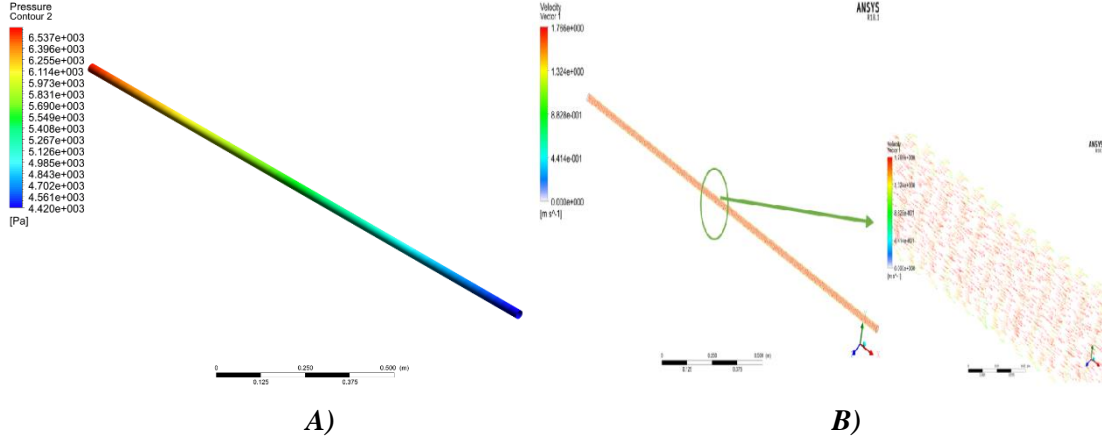
$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Vizkozite Kuvveti}} = \frac{V_{ort} \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V_{ort} \cdot D}{\mu} \quad 10$$



Şekil 4. Re 50066,88 için alüminyum boru boyunca basınç değişimi analizi

Şekil 4'te  $Re=50066,88$  için alüminyum boru boyunca basınç değişimi grafiği görülmektedir. Sayısal analiz için 4 farklı ağ yapısı çalışılmıştır. Ağ yapısı istatistikleri Tablo 2'de yer almaktadır. Deneysel sonuçlarla en iyi örtüşen ağ yapısı AĞ\_2 olarak belirlenmiştir. Buradan sonraki verilen tüm sonuçlar AĞ\_2 ile elde edilen sonuçlardır. Girişte basınç maksimum değere sahiptir. Çıkışa doğru basınç düşmüştür. Yapılan sayısal analizde Giriş şartı olarak (Inlet=Velocity) hız tanımlanmış çıkış şartı olarak boru boyunun 1,7 m elde edilen deney sonucu (Outlet= Pressure, Outlet= 4418 Pa) olarak tanımlanmıştır. Akışkan özellikleri 27 °C de su için ANSYS FLUENT 18.1' in kütüphanesinde yer alan değerler kullanılmıştır. Sayısal analiz programında yedi noktadan basınç çıkışı olduğu sistemde gösterilmiştir. Boru giriş kısmı ve yedinci basınç ölçüm noktası debi ölçüm tankına kadar hortum ile bağlantılı olduğundan dolayı bu hortumun içindeki sürtünmeden kaynaklı basınç düşümü deney borusu ile ilgili

olmadığı için yedinci noktadaki değer sayısal analize basınç çıkışı olarak tanımlanmış ve birinci ile altıncı basınç noktaları arasındaki basınç dağılımı ANSYS FLUENT 18.1 sayısal analiz programında analiz edilerek bulguların doğruluğu %1 den az hata ile doğrulanmıştır. Sayısal analiz sonuçları ve  $Re=50066,88$  için tüm boruların basınç değişimi değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 5A’da  $Re=50066,88$  için boru boyunca basınç değişimi konturları görülmektedir.



Şekil 5. A)3-B boru boyunca basınç değişimi ve B) boru boyunca hız vektörleri

Şekil 5B’de boru boyunca değişen hız vektörleri gösterilmiştir. Bu gösterimde borunun tam orta noktasında bir bölge seçilmiş ve yakınlştırılarak hız vektörlerinin detaylı gösterilmesi amaçlanmıştır. Şekil 6’da boru boyunca hız değişim kontürleri görülmektedir. Hız boru cidarlarında kaymama koşulu sebebiyle sıfırdır. Sınır tabaka bölgesinde de en düşük seviyededir. Ayrıca ilk girişte akış tam gelişmiş olmadığı için düşük hızda görülmektedir. Bu çalışmada ölçülen basınç değerlerinden sadece birincisi ( $P_1$ ) gelişmemiş akış bölgesindedir. Diğer tüm ölçümler tam gelişmiş akış bölgesindedir. Tam gelişmiş bölge başlangıcı ( $L$ )  $L=10*D$  ile hesaplanmıştır.



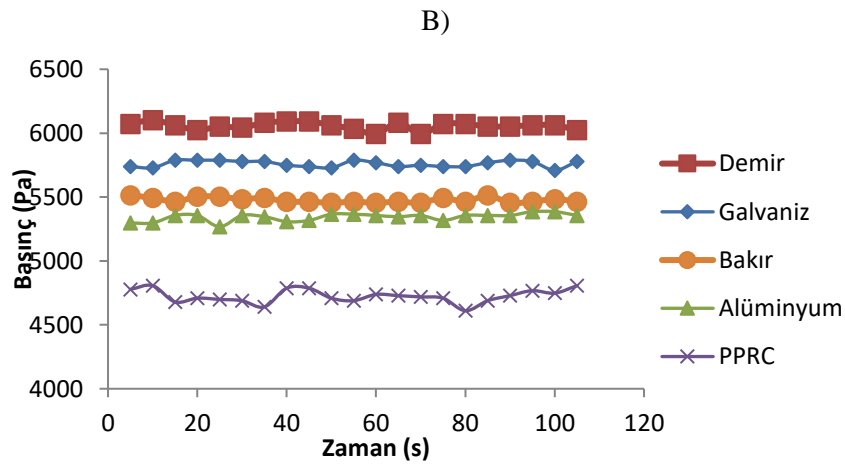
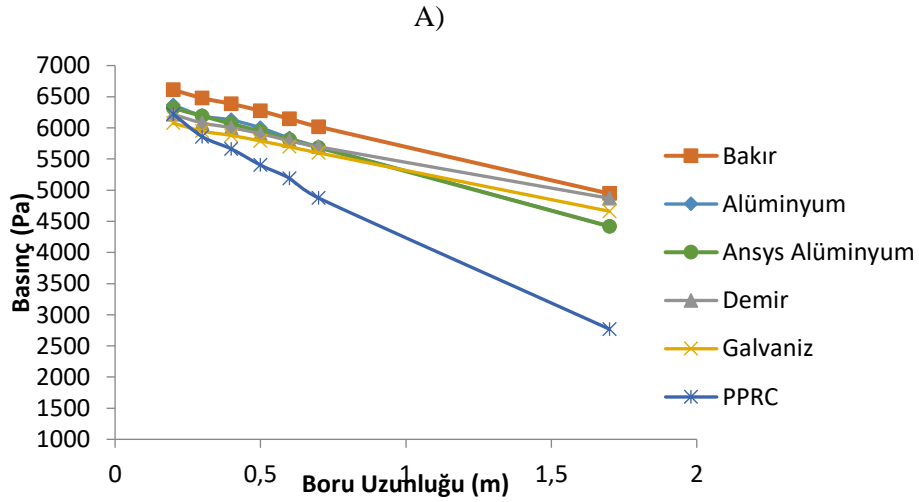
Şekil 6. Boru boyunca hız değişim kontürleri

Alüminyum pürüzsüz boru için elde edilen deneysel verilen, sayısal analizi yapılarak doğruluğu kontrol (crosscheck) edilmiştir. Bu çalışma ile deney setinin validasyonu sağlanmıştır. AĞ\_2 çözüm ağ modeli ile deneysel veriler %1’den daha az hata ile modellenmiştir. Sayısal analiz ile boru boyunca basınç düşümü modeli incelendikten sonra diğer borular için deney düzeneği kullanımına devam edilmiştir. Bu deney düzeneği ile elde edilen  $Re=50066,88$ ’deki ortalama basınç değişimi değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Tüm borulardaki basıncın Reynolds = 50066,88' deki boru boyunca değişim değerleri

Boru boyu (metre)	Alüminyum (Pa)	ANSYS Alüminyum (Pa)	Bakır (Pa)	Siyah (Pa)	Galvaniz (Pa)	PPRC (Pa)
0,2	6363,89	6318	6611,36	6216,11	6075,69	6222,42
0,3	6193,38	6191	6477,38	6078,84	5947,28	5858,44
0,4	6126,11	6066	6384,42	6002,29	5877,96	5660,94
0,5	6001,38	5942	6274,14	5907,38	5790,03	5402,77
0,6	5835,55	5811	6143,80	5792,10	5695,12	5189,76
0,7	5693,07	5684	6017,58	5695,60	5597,88	4873,21
1,7	4418,70	4418,70	4944,39	4868,87	4660,87	2769,58

Şekil 7'de  $Re = 50066,88$ 'de yapılan deneyler sonucu elde edilen Tablo 3' deki boruların basıncının boru boyunca değişim değerlerinin ve sayısal analizinin grafiği yer almaktadır. Bu çalışmada ANSYS FLUENT 18.1 sayısal analiz programı kullanılarak deneysel verilerin, sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması sonucu kontrolü sağlanmıştır. Sayısal analiz yapılarak boruların sınıflandırılması için kurulan deney düzeneğinden oldukça hassas sonuçlar elde edilebileceğini göstermek hedeflenmiştir.



**Şekil 7. A)** Tüm borulardaki basıncın Reynolds = 50066,88 deki boru boyunca değişimi **B)** Tüm boruların  $P_1$  deki basıncının  $Re=45832,12- 51276,56$  arasındaki zamana göre değişimi

**Tablo 4.** Tüm boruların  $P_1$  deki basıncının  $Re=45832,12- 51276,56$  arasındaki zamana göre değişim değerleri

Zaman (Saniye)	Alüminyum (Pa)	Bakır (Pa)	Demir (Pa)	Galvanizli (Pa)	PPRC (Pa)
5 Sn	5297,4	5513,22	6072,39	5738,85	4777,47
10 Sn	5297,4	5493,6	6101,82	5729,04	4806,9
15 Sn	5356,26	5464,17	6062,58	5787,9	4679,37
20 Sn	5356,26	5503,41	6023,34	5787,9	4708,8
25 Sn	5267,97	5503,41	6052,77	5787,9	4698,99

Şekil 7B’de görüldüğü üzere  $Re = 45832,12- 51276,56$  aralığında yapılan deneyler sonucu; demir, galvaniz çelik boruların zamanla ve boru boyunca basınç değişim değerlerinin grafiklerde birbirlerine yaklaşım gösterdiği için boru cinsi yönünden benzerlik gösterdikleri kanısına varılmış olup diğer boru tiplerinin de grafiklerdeki değerleri incelendiği zaman alüminyum, bakır borunun değerlerinin birbirlerine benzerlik gösterdiği ve PPRC borunun basınç değişiminin deneyler sonucu elde edilen grafikler incelediğinde deneyde kullanılan diğer boru tiplerinden tamamen farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu sınıflandırmanın doğruluğunun desteklenmesi açısından ANOVA analiz metodu kullanılarak yapılan sınıflandırmanın uygunluğunun testi için araştırmada toplam 1575 veri noktası kullanılmıştır. ANOVA kullanılarak analizi yapılan sistemlerin elde edilen verilerinden; sistemin efektif etkisini araştırmak ve sistemleri oluşturan tasarım parametrelerinin %95 oranında etki seviyesini ( $\alpha$ ) belirlemek amacıyla; sistemi oluşturan elemanları ANOVA, F-istatistik testine tabi tutar. Buradan çıkan sonuçların kalitesine göre sistemin karakteristiğine etki eden tasarım parametrelerinin sisteme etkisini göstermek için elde edilen verilerin analizi gerçekleştirilir. (yani  $\alpha < 0.05$  olasılık) [30,31]. Elde edilen verilerdeki sapmalar homejen olduğu zaman ve analizden elde edilen sonuçların pozitif olduğu görüldükten sonra Tukey’in anlamlı fark (HSD) analizi yapılmıştır. Bunun sebebi Tukey-HSD analizinin ancak gruplar arasında anlamlı bir fark olduğu zaman yapılır.

SPSS analizinin çıktıları bu bölümde aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Burada bizim için önemli olan akış hızı, ANOVA analiz programı ile hesaplanmıştır ( $F = 223.981$ ,  $p = 0.000$ ). Debi değerlerinin basınç düşüşünde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmış olduğu sonuçlarda gözlemlenmiştir.

**Tablo 5.** Akış hızının basınç düşüşüne etkisi

	Toplam Kareler	df	Ortalama Kare	F	Önem
Gruplar Arası	,064	71	,001	223,981	,000
Gruplar İçinde	,006	1503	,000		
Toplam	,071	1574			

Boru çapı değerleri basınç düşüşü için ANOVA hesaplamalarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmıştır ( $198,649$ ,  $p = 0.000$ ). Tukey-HSD testine göre, alüminyum ve bakır borular ayrı bir sınıfta yer alırken, galvanizli çelik ve demir borular başka bir sınıftadır. PPRC boru ise ayrı bir sınıftadır.

**Tablo 6.** Boru çapının basınç düşüşüne etkisi

	<i>Toplam Kareler</i>	<i>df</i>	<i>Ortalama Kare</i>	<i>F</i>	<i>Önem</i>
<i>Gruplar Arası</i>	,024	4	,006	198,649	,000
<i>Gruplar İçinde</i>	,047	1570	,000		
<i>Toplam</i>	,071	1574			

**Tablo 7.** Boru çapının homojen alt kümeleri

<i>Alfa için alt küme = 0.05</i>					
<i>Çap (m)</i>	<i>N</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	
,02760	315	,007012698412698			
,02775	315	,008108571428571			
,02600	315		,010061904761905		
,02500	315		,010428571428571		
,02050	315			,018081904761905	
<i>Önem</i>		,087	,917	1,000	

Boru malzemesi için ANOVA ( $F = 198,649$ ,  $p = 0.000$ ) elde edilmiştir. Bu basınç düşüşü boru malzemeleri arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olduğu anlamına gelir. Tukey-HSD testinde homojen alt kümeler alüminyum-bakır, galvanizli çelik-demir ve PPRC olarak tanımlanmıştır.

**Tablo 8.** Boru malzemesinin basınç düşüşüne etkisi

	<i>Toplam Kareler</i>	<i>df</i>	<i>Ortalama Kare</i>	<i>F</i>	<i>Önem</i>
<i>Gruplar Arası</i>	,024	4	,006	198,649	,000
<i>Gruplar İçinde</i>	,047	1570	,000		
<i>Toplam</i>	,071	1574			

**Tablo 9.** Boru malzemesinin homojen alt kümeleri

<i>Alfa için alt küme = 0.05</i>					
<i>Boru Malzemesi</i>	<i>N</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	
<i>Galvanizli Çelik</i>	315	,007012698412698			
<i>Demir</i>	315	,008108571428571			
<i>Alüminyum</i>	315		,010061904761905		
<i>Bakır</i>	315		,010428571428571		
<i>PPRC</i>	315			,018081904761905	
<i>Önem</i>		,087	,917	1,000	

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Sonuç olarak bu çalışmada, yaptığımız deneyler sonucu elde ettiğimiz verilerin yani boruların basıncının boru boyunca ve zamana göre değişim değerleri incelenmiştir. Kurulan deney setinin analizini yapmak için başlangıçta; Deneyde kullanılan alüminyum borunun 3B modelini SOLIDWORKS 2018'te oluşturulmuş olup, ANSYS FLUENT 18.1 sayısal analiz programı kullanılarak deney setinden elde edilen;  $Re = 45832,12 - 51276,56$  aralığında Reynolds sayısının değişimi ile boru boyunca meydana gelen ve şekil 7'de gösterilen basınç değişimlerine karşılık gelen verilerin doğruluğunun kontrolü (%1'den az hata ile) sağlanmıştır. Kurulan deney setinden hassas sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir. Benzer çalışmalar yapacak araştırmacılar için sayısal metot ortaya konmuş ve deneysel verilerin gözle okunarak belirlenmesinden önce özel görüntü işleme metotları kullanmaları tavsiye edilmiştir. Boru malzemeleri sert metaller (demir, galvanizli çelik vb.), yumuşak metaller (bakır, alüminyum vb.) ve plastik (PPRC vb.) olarak sınıflandırılabilir olduğu tespit edilmiştir. Aynı sonuçlara göre boru çapları, çaplar arasında yüzde 10 fark ile alt gruplara ayrılabilir olduğu gözlemlenmiştir.

Deneyde kullanılan boru tipleri kendi aralarında sınıflandırıldıktan sonra sınıflandırılmanın doğruluğunun tespiti yönünden; basınç düşüşü, pürüzlülük, boru çapı, boru malzemesi ve sıvının akış süresine göre istatistiksel olarak anlamlı akış hızlarını hesaplamak kaydıyla SPSS programında bir ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA analizi ile boru sınıflandırmasının uygunluğu test edilerek literatüre uygun akış değişimi, boru çapı aralıkları ve boru malzemesi sınıflandırılmaları kazandırılmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu proje Fırat Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir. FUBAP MF.11.18.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sparrow, A.J.P., Tong, J.C.K., Bettenhausen, D.W. (2010). Internal flows which transit from turbulent through intermittent to laminar. *International Journal of Thermal Sciences*. 49. 256–263
- [2] Çengel, Y., Cimbala, A.J.M. (2008). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. Birinci baskıdan çeviri. İzmir: Güven Kitabevi.
- [3] White, F. M. (2003). *Fluid Mechanics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
- [4] Colebrook, C.F. (1939). Turbulent Flow in Pipes. with Particular Reference to the Transition between the Smooth and Rough Pipe Laws. *Journal of the Institute of Civil Engineers London*. 11. pp. 133–156.
- [5] Moody, L. F. (1944). Friction Factors for Pipe Flows. *Transactions of the ASME* 66. pp. 671–684.
- [6] Bhatti, M. S. and Shah. R. K. (1987). Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts. In *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. ed. S. Kakaç. R. K. Shah. and W. Aung. New York: Wiley Interscience.
- [7] Fang, X., Xu, L., Chen, Y., Chen, W. (2019). Correlations for friction factor of turbulent pipe flow under supercritical pressure: Review and a new correlation. *Progress in Nuclear Energy* <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103085>
- [8] Abushammala, O., Hreiz, R., Lemaître, C., Favre, E. (2019). Laminar flow friction factor in highly curved helical pipes: numerical investigation, predictive correlation and experimental validation using a 3D-printed model. *Chemical Engineering Science* <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.018>.
- [9] Avcı, A., Karagoz, I. (2019). A new explicit friction factor formula for laminar, transition and turbulent flows in smooth and rough pipes. *European Journal of Mechanics / B Fluids* 78. 182–187.

- [10] Heralda, M., Bingham, Z., Santos, R., Ruggles, A. (2018). Simulated time-dependent data to estimate uncertainty in fluid flow measurements. *Nuclear Engineering and Design* <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.07.005>
- [11] Pereira, C.E.G., da Cruz, G.A., Filho, L.P., Justino, L.R., Paraiso, E.C.H., Rocha, J.M., Calçada, L.A., Scheida, C.M. (2019). Experimental analysis of pressure drop in the flow of Newtonian fluid in coiled tubing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.082>
- [12] Naidek, B.P., Kashiwakura, L.Y., Alves, R.A., Bassani, L.C., Stel, H., Morales, R.E.M. (2017). Experimental analysis of horizontal liquid-gas slug flow pressure drop in d-type corrugated pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science* 81. 234–243.
- [13] Yanga, Y., Guo, J., Ren, B., Zhanga, S., Xiong, R., Zhanga, D., Cao, C., Liao, Z., Zhanga, S., Fu, S. (2018). Oil-Water flow patterns, holdups and frictional pressure gradients in a vertical pipe under high temperature/pressure conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.09.013>
- [14] ARSLAN, G., YAMAN, K., Farklı boylarda sarmal şerit yerleştirilmiş eğimli boru içi akışta ısı ve hidrodinamik performansının deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 33, Sayı 3*. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416405>.
- [15] GÜL, H., EVİN D. (2007). Titreşim Yapan Borularda Isı Transferinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. Cilt 22, Sayı 3.
- [16] Lyu, Y., Liu, W., Chow, T., Su, H., Qi, X. (2019). Pipe-work optimization of water flow window. *Renewable Energy* 139.136e146.
- [17] Shah, M. S., Joshi, J. B., Kalsi, A. S., Prasad, C. S. R. and Shukla, D. S. (2012). Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation, *Chemical Engineering Science*, vol. 71, pp. 300–309.
- [18] Roul, M. K. and Dash, S. K. (2012). Single-Phase and Two-Phase Flow Through Thin and Thick Orifices in Horizontal Pipes, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 134, no. 9, Aug.
- [19] Yadav, A. S. and Bhagoria, J. L. (2014). Heat transfer and fluid flow analysis of an artificially roughened solar air heater: A CFD based investigation, *Frontiers in Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 201–211.
- [20] ŞAHİN, H. M., DAL, A. R., ÖZKAYA, M. (2020). İç İçe Borulu Yay Tip Türbülantörlü Bir Isı Değiştiricisinin RNG k-ε Türbülans Modeli ile Sayısal Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8.1: 64-78.
- [21] KARYEYEN, S., İLBAŞ, M. (2018). Oksitleyiciye su buharı ilavesinin kok fırını gazı yanma davranışlarına olan etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6.2: 319-335.
- [22] Holman, J.P., (1989). *Experimental Methods for Engineers*, 5th edition Mc-Graw Hill Company, New York.
- [23] Sönmez, K., Kaya, A. and Kamer, M. S. (2018). Farklı Kesitli Genişlemeli Geometrilerin Klima Santralleri İçin Tasarlanan Bir Anemostat Tip Difüzlü Boş Hücredeki Akış Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi, *Selçuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 694–711.
- [24] S. M. Salim, M. Ariff, and S. C. Cheah, Wall y+ approach for dealing with turbulent flows over a wall mounted cube, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, vol. 10, no. 5–6, pp. 341–351, 2010.

- [25] Salim, S. M. (2011). Wall  $y +$  Approach for Dealing with Pollutant Concentration Prediction in 2D Street Canyons 7 th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, no. January.
- [26] Hao, X., Xu, P., Suo, H. and Guo, L. (2020). Numerical investigation of flow and heat transfer of supercritical water in the water-cooled wall tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 148, p. 119084.
- [27] Ting, X., Miedema, S. A. and Xiuhan, C. (2019). Comparative analysis between CFD model and DHLLDV model in fully-suspended slurry flow, Ocean Engineering, vol. 181, no. April, pp. 29–42.
- [28] Ahsan, M. (2014). Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using  $k-\epsilon$  turbulence model with enhanced wall treatment. Beni-Suef University journal of basic and applied sciences, 3(4), 269-277.
- [29] Fluent, A. (2013). ANSYS fluent theory guide 15.0, ANSYS, Canonsburg, PA.
- [30] Ratnam,C., Vikram,K.A., Ben,B.S. and Murthy,B.S.N.,(2016). Process monitoring and effects of process parameters on responses in turn-milling operations based on SN ratio and ANOVA, Measurement, vol. 94, pp. 221–232.
- [31] Chakraborty,S., Chowdhury,R.(2016). Modelling uncertainty in incompressible flow simulation using Galerkin based generalized ANOVA, Computer Physics Communications, Volume 208, Pages 73-91, ISSN 0010-4655, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.003>.



## The Effect of Organic Chemicals on Children's Room Equipment Elements on Parents' Preferences

 Kemal YILDIRIM\*  Hakan YILMAZ  Betül HUYUGÜZEL<sup>3</sup> 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

The results obtained and the recommendations developed for this study, which was carried out to determine whether the parents had information about the harmful effects of organic chemicals emitted from the children's room equipment elements on human health, are systematically explained below.

#### Article Info:

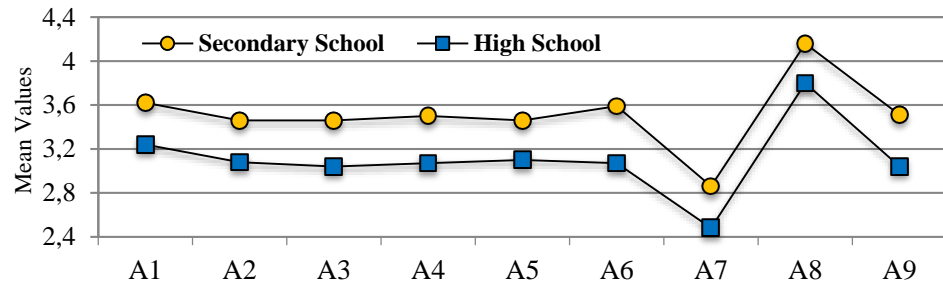
Research article  
 Received: 03/07/2020  
 Revision: 17/09/2020  
 Accepted: 22/09/2020

#### Highlights

- Children's health.
- Organic chemical.
- Parent.

#### Keywords

Children's room  
 Equipment element  
 Design  
 Human health  
 Organic chemicals.



**Figure A.** The level of knowledge about organic chemicals emitted from children's room equipment elements according to parents' education

**Purpose:** In this study, it was aimed to determine whether parents of different ages, genders and educational levels living in Ankara have knowledge about the harmful effects of organic chemicals spreading from children's room equipment elements on human health.

**Theory and Methods:** The questionnaire, developed for this purpose, was applied to 205 people selected by random method. As a result, it was determined that the parents did not have enough information about the organic chemicals coming out of the children's room equipment elements.

**Results:** Regarding the subject, it is seen that the participants aged 25-45 have less knowledge than the older people of 46 and above, while the secondary students have less knowledge than the higher education. However, no significant difference was found between the evaluations of participants with different genders in general. As a result, informing and raising awareness of users on this subject may enable the producer sector to reduce the use of materials that negatively affect human health.

**Conclusion:** These results show that the parents do not have enough information about the organic chemicals emitted from the children's room equipment elements. Based on these results, people can stay mentally and physically healthy, indoor air quality is at least as clean as outdoor air quality, less damage to the natural environment, a sustainable world, healthy and successful generations, family integrity can be preserved for a long time and happy and It is essential to control indoor pollutants for a peaceful society.

GU J Sci, Part C, 8(4): 798-809 (2020)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>**Çocuk Odası Donatı Elemanlarındaki Organik Kimyasalların Ebeveynlerin Tercihleri Üzerindeki Etkisi**

Kemal YILDIRIM\* Hakan YILMAZ Betül HUYUGÜZEL

*Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçşifleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA***Öz**

Bu çalışmada, Ankara'da yaşayan farklı yaş, cinsiyet ve eğitim seviyesine sahip ebeveynlerin, çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri hakkında bilgi sahibi olup olmadıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında geliştirilmiş olan anket, tesadüfi yöntemle seçilen 205 kişiye uygulanmıştır. Sonuçta, ebeveynlerin, çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkında yeterince bilgiye sahip olmadıkları tespit edilmiştir. Konuya ilişkin olarak 25-45 yaşındaki katılımcıların 46 ve üzeri yaşlılara oranla, diğer taraftan ortaöğretimlilerin ise yükseköğretimlilere oranla daha az bilgiye sahip oldukları görülmektedir. Fakat farklı cinsiyete sahip katılımcıların değerlendirmeleri arasında genel itibarıyla belirgin bir farklılık bulunamamıştır. Sonuç olarak, bu konuda kullanıcıların bilgilendirilmesi ve farkındalık yaratılması, fabrikasyon üretim yapan sektörün insan sağlığını olumsuz etkileyen malzeme kullanımını azaltmasını sağlayabilir.

**The Effect of Organic Chemicals on Children's Room Equipment Elements on Parents' Preferences****Makale Bilgisi**

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 03/07/2020  
Düzeltilme: 17/09/2020  
Kabul: 22/09/2020

**Anahtar Kelimeler**

*Çocuk odası*  
*Donatı elemanı*  
*Tasarım*  
*İnsan sağlığı*  
*Organik kimyasallar.*

**Keywords**

*Children's room*  
*Equipment element*  
*Design*  
*Human health*  
*Organic chemicals.*

**Abstract**

In this study, it was aimed to determine whether parents of different ages, genders and educational levels living in Ankara have knowledge about the harmful effects of organic chemicals spreading from children's room equipment elements on human health. The questionnaire, developed for this purpose, was applied to 205 people selected by random method. As a result, it was determined that the parents did not have enough information about the organic chemicals coming out of the children's room equipment elements. Regarding the subject, it is seen that the participants aged 25-45 have less knowledge than the older people of 46 and above, while the secondary students have less knowledge than the higher education. However, no significant difference was found between the evaluations of participants with different genders in general. As a result, informing and raising awareness of users on this subject may enable the producer sector to reduce the use of materials that negatively affect human health.

**1. GİRİŞ (INTRODUCTION)**

Son zamanlarda dünyaya paralel olarak Türkiye'de yaşayan kullanıcıların önemli bir bölümünün de iç mekân donatı elemanları tercihlerinde fabrikasyon ürünlere yönlendiği görülmektedir. Kullanıcıların konutlarında ya da işyerlerinde fabrikasyon ürünleri tercihinde; geniş renk, desen ve malzeme yelpazesıyla ürün çeşitliliği, düşük fiyat, hemen teslim gibi avantajlar etkili olmaktadır. Fabrikasyon üretimin getirdiği bu avantajlarla birlikte, kullanıcının sağlığı istemeden de olsa donatı elemanlarından ortama yayılan zararlı kimyasallar nedeniyle olumsuz etkilenmektedir [1]. Bu durumda, ebeveynlerin satın aldığı çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan zararlı gazların çocuklarının sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri hakkında ne ölçüde bilgiye sahip olduklarının bilinmesinde yarar vardır. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada çocukların sağlığını doğrudan etkileyen bu zararlı kimyasallar hakkında ebeveynlerin ne ölçüde bilgiye sahip oldukları belirlenmeye çalışılmıştır.

Literatüre bakıldığında, bu alanda sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Kurtoğlu ve Koç [2] çalışmasında, mobilyaların dikkatli seçildiğinde uzun yıllar kullanılabileceği, bu nedenle fiyat, kalite, malzeme, sağlamlık ve çeşit konusunda iyi bir araştırma yapılmadan mobilya satın alınmaması gerektiği önerilmiştir. Demirarslan ve Aytöre [3] çalışmasında, çocuğun doğasına, gelişimine ve ihtiyaçlarına uygun kararların alınmasında ailenin sorumlu olduğu, çocuğun zamanının çoğunluğunu geçirdiği odasında bulunan mobilyaların fiziksel çevrede uyarıcı bir rol üstlendiği, doğru tasarlanan fiziksel çevrenin, çocuğun zihinsel gelişimi üzerinde önemli bir paya sahip olduğu, çocuğun bu mekânda oynama ve öğrenme eylemlerini bir arada gerçekleştirebilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, çocuk odasında kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerinin yanı sıra insan sağlığı üzerindeki etkilerinin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Tavşan [4] çalışmasında, çocuk mobilyalarının üretiminde masif ahşap ve/veya kontrplak malzemelerin öne çıktığı, yongalevha (YL) ve liflevha (MDF) malzemelerinin de yaygın olarak kullanıldığı bildirilmiştir. Burdurlu, Kılıç, İlçe, Elibol ve Yener [5] çalışmasında, çocuk odası mobilyaları satın alınırken kalite (%48,2), ekonomi (%47,1) ve kullanılan malzemelerin (%47,1) ebeveynler tarafından yeterince önemsenmediği, buna karşın tercihlerinde mobilyanın dayanıklılığı (%67,1), kullanışlılığı (%74,1) ve emniyetli olması (%76,5) özelliklerinin öne çıktığı ifade edilmiştir.

Wan ve ark. [6] çalışmasında, Çin'in hızlı ekonomik gelişimi insanların yaşam standartlarını iyileştirmesi ile insanların sağlık bilincini ve çevre bilincini yükselttiği ve bu nedenle ebeveynlerin çocukları için bünyesinde toksik maddeler olmayan malzemelerden üretilmiş ve fonksiyonel gereksinimlere uygun ürünlerin tercih edildiğini vurgulamıştır. Ruth [7] çalışmasında, çocuklar için tercih edilecek mobilyaların, insan sağlığına zarar vermeyen malzemeler ve güvenlik ilkesi göz önünde bulundurularak tasarımının yapılması ve üretilmesinin özellikle iç mekân yaralanmalarından ve toksik etkilerden çocukları koruyacağını vurgulamıştır. Ayrıca sağlıklı, güvenli ve sakin bir genç nesil için bunun önemli bir kriter olduğunu da belirtmiştir. Toivonen [8] Finlandiya'da yaptığı çalışmasında, ürün kalitesinin algılanmasında satış fiyatının önemli bir rol oynadığı ileri sürülmüştür. Aksakal ve Güler [9] çalışmasında; yaygın olarak kullanılan mobilya malzemelerinin beraberinde kimyasalları da getirdiği bildirilmiştir. Yıldırım ve Ünlü'nün [1] çalışmasında ise katılımcıların önemli bir kısmının organik kimyasallar hakkında yeterli bilgiye sahip olmadıkları bildirilmiştir.

Bina ve iç donatı elemanlarından ortama yayılan fenolik bileşikler, organoklorlar ve formaldehit gibi organik kimyasallar; uzun süreli ve sürekli temasta insan sağlığına oldukça büyük zararlar verebilmektedir. Thiermeyer [10] çalışmasında, iç mekân havasına karışan bu zararlı kimyasal maddelerin günün 8 saati ve haftanın ortalama 40 saati üzerinde temas edilmesi halinde insan sağlığına zarar verdiği bildirilmektedir. Ayrıca, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) insanların zamanlarının %90'ını iç mekânlarda geçirdiklerini belirtmektedir [11,12]. Bu durumda, insanların yaşamının çoğunun kapalı mekânlarda geçirildiği düşünüldüğünde, bu sınırların kolayca aşılabileceği ve sonuçta zararlı maddelere maruz kalılabileceği açıkça görülmektedir. Sağlıklı bir insanın günde ortalama 15 m<sup>3</sup> temiz hava solumaya ihtiyacı bulunmaktadır [13]. Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA) iç mekân hava kirliliğinin dış ortam hava kirliliğinden 2 ile 10 kat arasında daha kirli olduğunu belirtmektedir [14]. Diğer taraftan, iç mekân havasını etkileyen faktörlerden biri de dış ortamdaki hava kirliliğidir [15]. Kullanılan yapı malzemesine bağlı olarak dış ortam havası iç mekâna nüfuz etmektedir.

1970'lerin ortalarında yaşanan enerji kriziyle birlikte yapı endüstrisi, enerjinin tüketimi ve korunması üzerinde çalışmaya başlamıştır. Düşük enerji kullanımı için yapılarda uygulanan yalıtım, yapının hava değişim oranını minimum hale getirmiştir. Ancak, bu nedenle oluşan iç mekân kirliliği dikkate değer bir önem oluşturmaya başlamıştır. Ahşap, mermer ve doğal liflerin kullanımı azalmış yerini yongalevha (YL), liflevha (MDF), sentetik lifler ve plastikler almıştır. Bu ürünler, petrolün son ürünleridir ve her biri ayrı olmak üzere belirli sıcaklığın üzerinde iç mekân havasında dağılıp, birikebilmektedir. İç mekânda kullanılan duvar, tavan ve döşeme kaplamaları, mobilyalar, halılar, kumaşlar, zararlı böcek zehirleri, bilgisayar, fotokopi makinesi, kişisel bakım ürünleri ve biyoatıklardan ortama yayılan uçucu organik kimyasalların emisyonlarının birikmiş etkileri insanların sağlığına büyük zararlar verebilmektedir. Bu kirleticiler, iç mekânın hava kalitesini olumsuz yönde etkileyerek çeşitli sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Dr. Bill Wolverton [16-23] tarafından tespit edilen iç mekânda bulunan kimyasal emisyon kaynaklarına ilişkin sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kimyasal emisyon kaynakları

Kimyasal Emisyon Kaynakları	Formaldehide	Xylene/Toluene	Benzene	Trichloroethylene	Ammoniac	Alcohol	Acetone
Yapıştırıcılar	■	■	■	-	-	■	-
Biyolojik Maddeler	-	■	-	-	■	■	■
Halılar ve Kumaşlar	■	-	-	-	-	■	-
Birleştirme Elemanları	■	■	■	-	-	■	-
İç Mekân Kaplamaları	■	■	■	-	-	■	-
Kozmetik Ürünler	-	-	-	-	-	■	■
Yazıcılar ve Basılı Fotokopi	-	■	■	■	■	-	-
Yongalevha	■	■	■	-	-	■	-
Kontrplak	■	-	-	-	-	-	-
Boyalar ve Vernikler	■	■	■	-	-	■	-
Tütün Dumanı	■	-	■	-	-	-	-

Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi iç mekân donatı elemanlarında kullanılan yongalevha, liflevha, laminant, PVC gibi yapay malzemelerden ortama yayılan gazların oluşturduğu hava kirliliğine maruz kalan kişilerde, mukoza membran tahrişi (göz, burun, boğaz, ve deride tahriş), kızarıklık vb. deri reaksiyonları, genel semptomlar (baş ağrısı, bitkinlik, baş dönmesi, mide bulantısı, konsantrasyon zorluğu), nefes alıp verme zorluğu ve kanser gibi insan vücudunda ve hücrelerinde önemli yapısal değişimlere/hasarlara yol açabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, bina ve iç mekân donatı elemanlarının malzemelerinin seçimi ve kullanım biçimi sağlık açısından son derece önem taşımaktadır. Buna göre, merkezi ve yerel yöneticiler, tasarımcılar iç mekânlarda kullanılacak malzemelerin açığa çıkaracağı birikmiş gaz emisyon değerlerinin Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen sınır değerler üzerinde olmamasına dikkat etmelidirler (Tablo 2). WHO tarafından yayınlanan raporda, insanların zamanlarının %90'ını iç mekânlarda geçirdikleri bildirilmiştir. Bu çerçevede iç mekân hava kalitesi, en az dış ortam hava kalitesi kadar önem kazanmaktadır [11,12].

**Tablo 2.** İç mekânlarda maksimum hava kirliliği düzeyleri ( $mg^3$ ) [11]

Kirleticiler	WHO	ASHRAE
Sigara dumanı	0,15	-
Azotdioksit	0,32	0,100
Karbonmonoksit	30,0	40,0
Karbondioksit	12,000	4,500
Formaldehit	0,12	0,120
Sülfürdioksit	1,35	0,08
Ozon	0,15	0,100
Asbest	10 <sup>5</sup>	-
Radon	70	37

WHO: World Health Organizations, ASHRAE: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Condition Engineers.

Konu ile ilgili yukarıdaki literatür incelendiğinde, insanların organik kimyasalların zararlı etkileri hakkında yeterli bilgiye sahip olmadıklarını göstermektedir. Hâlbuki yine literatürde görüleceği üzere, ortama yayılan uçucu gazların insan yaşamını tehdit eden zararlı etkileri kanıtlanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışmalarla, organik kimyasallardan daha kolay etkilenen çocukların yaşadığı mekânlardan “ortama yayılan zararlı gazlar” hakkında ebeveynlerin bilinç düzeyinin artırılması, iç mekân donatı elemanlarının tasarımında ve üretiminde sürdürülebilir çevreci malzemelerin kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, ebeveynlerin, çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri hakkında bilgi sahibi olup olmadıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürde ortaya koyulan bu tespitler ışığında, bu araştırmanın amacına uygun olarak geliştirilen araştırma hipotezi aşağıda verilmiştir.

**H1:** Farklı cinsiyete sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeyleri birbirinden farklıdır.

**H2:** Farklı yaşa sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeyleri birbirinden farklıdır.

**H3:** Farklı eğitime sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeyleri birbirinden farklıdır.

## 2. YÖNTEM (METHODS)

Bu çalışmada, ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırma yöntemi; katılımcılar, anket tasarımı ve uygulanışı ile istatistiksel değerlendirme alt başlıkları altında aşağıda ele alınmıştır.

### 2.1. Katılımcılar (Participants)

Türkiye'nin Ankara ilinde yaşayan ve tesadüfi yöntemle seçilen farklı yaş, cinsiyet ve eğitim seviyesine sahip 205 ebeveyn araştırma kapsamına alınmıştır. Araştırma kapsamına alınan ebeveynlerin %52,2'si kadın (107 kişi), %47,8'i erkek (98 kişi), %19,1'i ortaöğretimli (39 kişi), %80,9'u yükseköğretimli (166 kişi) ve %52,7'si 25-45 yaş (108 kişi), %47,3'ü 46 yaş ve üzeri (97 kişi) kişilerden oluşmaktadır.

### 2.2. Anketin Tasarımı ve Uygulanışı (Questionnaire Design and Application)

Araştırma anketinin tasarımında daha önce benzer çalışmalarda [1,24-26] geçerli ve güvenilir bulunmuş anketlerden faydalanılmış ve geliştirilen bu ayrıntılı anketle araştırma hipotezleri sınanmıştır. Ankette kapalı uçlu soru, çoktan seçmeli soru, birden çok seçenekli soru teknikleri kullanılmıştır. Anketin birinci aşamasında; deneklerin genel bilgilerine, ikinci aşamasında ise deneklerin bilgi düzeyini ölçmeye yönelik sorular bulunmaktadır. Araştırma anketi, ebeveynlerin çocuk odaları için temin ettiği iç mekân donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkileri hakkında ne ölçüde bilgiye sahip olduklarını belirlemek için Google üzerinden internet ortamında uygulanmıştır. Denekler anket verilerini, Aralık (2019) ayı içinde hafta içi ve hafta sonu dâhil olmak üzere günün farklı zamanlarında Google üzerinden girmişlerdir. Denekler anketi yaklaşık 15 dakikada tamamlamışlardır.

### 2.4. İstatistikî Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Bu çalışma, Ankara'da yaşayan 205 ebeveyn ile yapılmış olup, araştırmanın varsayımını oluşturan bağımlı ve bağımsız değişkenler uygun istatistiksel yöntemlerle test edilmiştir. Buna göre, verilerin yüzdelik değerleri, aritmetik ortalamaları ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Değişkenler arasındaki farklılıkların ise  $p < 0,05$  düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığı tekli varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde 'SPSS' ve 'Microsoft Office Excel' programları kullanılmıştır.

## 3. BULGULAR (RESULTS)

Araştırmaya katılan ebeveynlerin %34,8'inin 1 çocuğu, %44,9'unun 2 çocuğu ve %20,3'ünün ise 3 ve üzeri çocuğu olduğu görülmektedir. Ayrıca çocukların uyku dışında odalarında geçirdikleri zaman dilimlerine bakıldığında, çocukların %25,6'sının 1-2 saat, %34,5'inin 3-4 saat, %25,6'sının 5-6 saat ve %14,3'ünün ise 7-8 saat zaman geçirdiği görülmektedir.

### 3.1. Donatı Elemanlarına İlişkin Bulgular (Findings Regarding Interior Elements)

Araştırmaya konu olan çocuk odalarının tamamında bazalı / bazasız yatağın, %95'inde elbise dolabının, %72,1'inde çalışma masası ve kitaplığın, %53,7'sinde komodinin, %40,3'ünde şifonyerin ve %10,9'unda tuvalet masasının bulunduğu görülmektedir. Ayrıca çocuk odalarında bulunan donatı elemanlarının %37,2'sinde masif ahşap üzeri vernik, %34,2'sinde suntalam/MDF lam, %22,4'ünde MDF üzeri lake boya ve %33,2'sinde ise ahşap kaplamalı YL üzeri vernik malzemelerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu bulgular, kısmen Tavşan'ın [4] sonuçlarını desteklemektedir.

### 3.2. Organik Kimyasallara İlişkin Bulgular (Findings Related to Organic Chemicals)

Katılımcı ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan

sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeylerinin belirlenmesi için oluşturulan bağımlı değişkenlerin güvenilirliği “Cronbach alfa” ile test edilmiş olup; sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir. Buna göre, ebeveynlerin bilgi seviyelerinin ölçümünde kullanılan 9 unsurun oluşturduğu araştırma ölçeğinin güvenilirlik katsayısı 0,91’dir. Daha önce Panayides [27], Kaplan ve Saccuzzo [28] tarafından yapılan çalışmalarda tüm unsurlar için alfa güvenilirlik katsayıları 0.70’in üzerinde çıktığında “güvenilir” olarak kabul edilebileceği bildirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen Cronbach alfa katsayısının belirtilen değerin üzerinde olduğu görülmektedir. Buna göre, kullanılan araştırma ölçeği “güvenilir” olarak kabul edilebilir.

**Tablo 3.** Bağımlı değişkenlerin güvenilirlik analizi

Bağımlı Değişkenler	Unsur Güvenilirliği	Ölçek Güvenilirliği
A1:İç mekân donatı elemanlarından açığa çıkan organik kimyasalların neler olduğunu biliyorum.	0,900	
A2:İç mekânda kullanılan ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen maddeler hakkında bilgim var.	0,898	
A3:İç mekân donatı elemanlarındaki organik kimyasalların yoğun bir kimyasal sis tabakası oluşturarak kötü hava kalitesine neden olacağını biliyorum.	0,894	
A4:İç mekân donatı elemanlarının yüzeylerinde kullanılan boyalar ve verniklerden açığa çıkan zehirli gazları biliyorum.	0,894	
A5:Formaldehit’in, tutkal ve koruyucu madde olarak çoğunlukla ev ürünlerinde, bina malzemelerinde; yongalevha, liflevha, lamine masif levha ve kontrplak gibi preslenmiş ahşap plakalarda, kâğıt ürünlerinde, döşemelik kumaşlarda, halılarda, kozmetiklerde ve daha birçok alanda kullanıldığını biliyorum.	0,898	0,910
A6:Formaldehit’in kanserojen etkiye sahip olduğunu biliyorum.	0,895	
A7:Birçok plastiğin ölümcül zehirli duman ve gaz açığa çıkardığını biliyorum.	0,906	
A8:Toprak, tuğla, doğal taş içerikli yapı malzemeleri ve elemanlarında bulunan radon gazının akciğer kanserine sebep olabileceğini biliyorum.	0,917	
A9:İnsan sağlığı için çok ciddi sorunlara neden olan kanserojenleri, mutajenleri, teratojenleri, virüsleri, bakterileri ve alerjenlerden oluşan iç mekân kirleticileri; yanıcı, uçucu ve zararlı gazlar ile parçacıkları ve radyasyonu biliyorum.	0,895	

*Not: Tabloda verilen her bir unsur ve ölçek için yüksek düzeyde güvenilirlik sağlanmıştır.*

Ankete katılan ebeveynlerin cinsiyetlerine göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeylerine ilişkin verilerin kategorik ortalamaları ve standart sapma değerleri ile ANOVA testi sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Ebeveynlerin cinsiyetlerine göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyleri

Bağımlı Değişkenler	Cinsiyet						ANOVA Sonuçları		
	Kadın		Erkek		Toplam		F	df	Sig.
	M	SD	M	SD	M	SD			
A1	3,42 <sup>a</sup>	0,90	3,20	0,89	3,31	0,90	2,952	1	0,087**
A2	3,23	0,91	3,07	0,82	3,15	0,87	1,572	1	0,211 <sup>ns</sup>
A3	3,08	1,05	3,16	0,94	3,12	1,00	0,255	1	0,614 <sup>ns</sup>
A4	3,17	1,09	3,13	0,90	3,15	1,00	0,108	1	0,743 <sup>ns</sup>
A5	3,23	1,01	3,10	0,91	3,17	0,97	0,833	1	0,363 <sup>ns</sup>
A6	3,12	1,25	3,21	0,99	3,16	1,13	0,279	1	0,598 <sup>ns</sup>
A7	2,40	1,08	2,72	0,99	2,55	1,05	4,880	1	0,028*
A8	3,68	1,28	4,07	1,19	3,87	1,25	7,807	1	0,025*
A9	3,06	1,15	3,21	0,97	3,13	1,07	1,020	1	0,314 <sup>ns</sup>

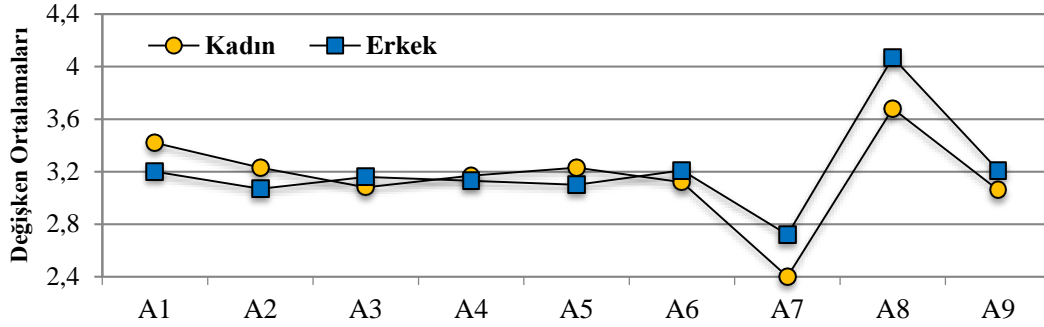
*Not: \* p<0,05 ve \*\* p<0,10 düzeylerinde önemlidir. ns: p<0,05 düzeyinde önemsizdir.*

*M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.*

*a: Değişken ortalamaları 1’den 5’e doğru sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).*

Tablo 4’de verilen sonuçlara bakıldığında, kadın ve erkek ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik

değerlendirmeleri arasında A1 (*İç mekân donatı elemanlarından açığa çıkan organik kimyasalların neler olduğunu biliyorum*), A7 (*Birçok plastiğin ölümcül zehirli duman ve gaz açığa çıkardığını biliyorum*) ve A8 (*Toprak, tuğla, doğal taş içerikli yapı malzemeleri ve elemanlarında bulunan radon gazının akciğer kanserine sebep olabileceğini biliyorum*) unsurları için  $p < 0,05$  ve  $p < 0,10$  düzeylerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar olduğu görülmektedir. Fakat diğer altı unsur için ebeveynlerin cinsiyetlerine göre değerlendirmeleri arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Bu farklılıkların grafiksel ifadesi Şekil 1'de verilmektedir.



Not: Değişken ortalamaları 1'den 5'e doğru sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

**Şekil 1.** Ebeveynlerin cinsiyetlerine göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyleri.

Şekil 1'de kadın ve erkek ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine bakıldığında, "Farklı cinsiyete sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeyleri birbirinden farklıdır" hipotezini (H1) desteklememektedir. Buna göre, farklı cinsiyete sahip ebeveynlerin organik kimyasalları bilme düzeyleri arasında belirgin bir farklılığın olmadığı söylenebilir.

Ankete katılan ebeveynlerin yaşlarına göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeylerine ilişkin verilerin kategorik ortalamaları ve standart sapma değerleri ile ANOVA testi sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5.** Ebeveynlerin yaşlarına göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyleri

Bağımlı Değişkenler	Yaş						ANOVA Sonuçları		
	25-45		46 ve üzeri		Toplam		F	df	Sig.
	M	SD	M	SD	M	SD			
A1	3,51 <sup>a</sup>	0,88	3,09	0,88	3,31	0,90	11,527	1	0,001*
A2	3,27	0,87	3,02	0,86	3,15	0,87	4,319	1	0,039*
A3	3,23	1,06	3,00	0,92	3,12	1,00	2,582	1	0,104**
A4	3,34	1,04	2,94	0,92	3,15	1,00	8,573	1	0,004*
A5	3,28	1,01	3,04	0,90	3,17	0,97	3,156	1	0,077**
A6	3,32	1,20	2,99	1,03	3,16	1,13	4,375	1	0,038*
A7	2,64	1,16	2,45	0,89	2,55	1,05	1,731	1	0,190 <sup>ns</sup>
A8	3,95	1,20	3,77	1,30	3,87	1,25	1,071	1	0,302 <sup>ns</sup>
A9	3,28	1,11	2,96	0,99	3,13	1,07	4,756	1	0,030*

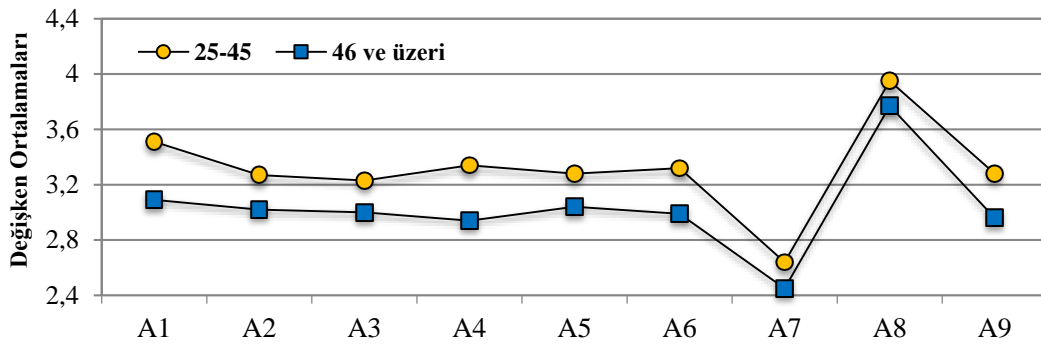
Not: \*  $p < 0,05$  ve \*\*  $p < 0,10$  düzeylerinde önemlidir. <sup>ns</sup>:  $p < 0,05$  düzeyinde önemsizdir.

M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

a: Değişken ortalamaları 1'den 5'e doğru sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Bilmiyorum).

Tablo 5'de verilen sonuçlara bakıldığında, 25-45 ve 46 ve üzeri yaşa sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında A1 (*İç mekân donatı elemanlarından açığa çıkan organik kimyasalların neler*

olduğunu biliyorum), A2 (İç mekânda kullanılan ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen maddeler hakkında bilgim var), A3 (İç mekân donatı elemanlarındaki organik kimyasalların yoğun bir kimyasal sis tabakası oluşturarak kötü hava kalitesine neden olacağını biliyorum), A4 (İç mekân donatı elemanlarının yüzeylerinde kullanılan boyalar ve verniklerden açığa çıkan zehirli gazları biliyorum), A5 (Formaldehit'in, tutkal ve koruyucu madde olarak çoğunlukla ev ürünlerinde ve bina malzemelerinde – yongalevhalar, liflevhalar, lamine masif levhalar ve kontrplaklar gibi preslenmiş ahşap plakalarda, kâğıt ürünlerinde, döşemelik kumaşlarda, halılarda, kozmetiklerde ve daha birçok alanda kullanıldığını biliyorum), A6 (Formaldehit'in kanserojen etkiye sahip olduğunu biliyorum) ve A9 (İnsan sağlığı için çok ciddi sorunlara neden olan kanserojenleri, mutajenleri, teratojenleri, virüsleri, bakterileri ve alerjenlerden oluşan iç mekân kirleticilerini; yanıcı, uçucu ve zararlı gazlar ile parçacıkları ve radyasyonu biliyorum) unsurları için  $p < 0,05$  ve  $p < 0,10$  düzeylerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların olduğu görülmektedir. Diğer taraftan A7 ve A8 unsurları için ebeveynlerin yaşlarına göre değerlendirmeleri arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Bu farklılıkların grafiksel ifadesi Şekil 2'de verilmektedir.



Not: Değişken ortalamaları 1'den 5'e doğru sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Biliyorum).

**Şekil 2.** Ebeveynlerin yaşlarına göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyleri.

Şekil 2'de farklı yaşa sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine bakıldığında, birbirine paralel yönde ve belirgin farklılıkların olduğu açıkça görülmektedir. Sonuçta tüm unsurlar için 25-45 yaş aralığındaki ebeveynlerin daha düşük değerleri (olumlu) aldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, "Farklı yaşa sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeyleri birbirinden farklıdır" hipotezini (H2) desteklemektedir. Buna göre, farklı yaşa sahip ebeveynlerin organik kimyasalları bilme düzeyleri arasında belirgin bir farklılığın olduğu söylenebilir.

Ankete katılan ebeveynlerin yaşlarına göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeylerine ilişkin verilerin kategorik ortalamaları ve standart sapma değerleri ile ANOVA testi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da verilen sonuçlara bakıldığında, ortaöğretim ve yükseköğretim mezunu ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında A1 (İç mekân donatı elemanlarından açığa çıkan organik kimyasalların neler olduğunu biliyorum), A2 (İç mekânda kullanılan ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen maddeler hakkında bilgim var), A3 (İç mekân donatı elemanlarındaki organik kimyasalların yoğun bir kimyasal sis tabakası oluşturarak kötü hava kalitesine neden olacağını biliyorum), A4 (İç mekân donatı elemanlarının yüzeylerinde kullanılan boyalar ve verniklerden açığa çıkan zehirli gazları biliyorum), A5 (Formaldehit'in, tutkal ve koruyucu madde olarak çoğunlukla ev ürünlerinde ve bina malzemelerinde – yongalevhalar, liflevhalar, lamine masif levhalar ve kontrplaklar gibi preslenmiş ahşap plakalarda, kâğıt ürünlerinde, döşemelik kumaşlarda, halılarda, kozmetiklerde ve daha birçok alanda kullanıldığını biliyorum), A6 (Formaldehit'in kanserojen etkiye sahip olduğunu biliyorum), A7 (Birçok plastiğin ölümcül zehirli duman ve gaz açığa çıkardığını biliyorum) ve A9 (İnsan sağlığı için çok ciddi sorunlara neden olan kanserojenleri, mutajenleri,



teratojenleri, virüsleri, bakterileri ve alerjenlerden oluşan iç mekân kirleticilerini; yanıcı, uçucu ve zararlı gazlar ile parçacıkları ve radyasyonu biliyorum) unsurları için  $p < 0,05$  ve  $p < 0,10$  düzeylerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların olduğu görülmektedir. Diğer taraftan A8 unsuru için ebeveynlerin eğitimlerine göre değerlendirmeleri arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır.

**Tablo 6.** Ebeveynlerin eğitimlerine göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyleri

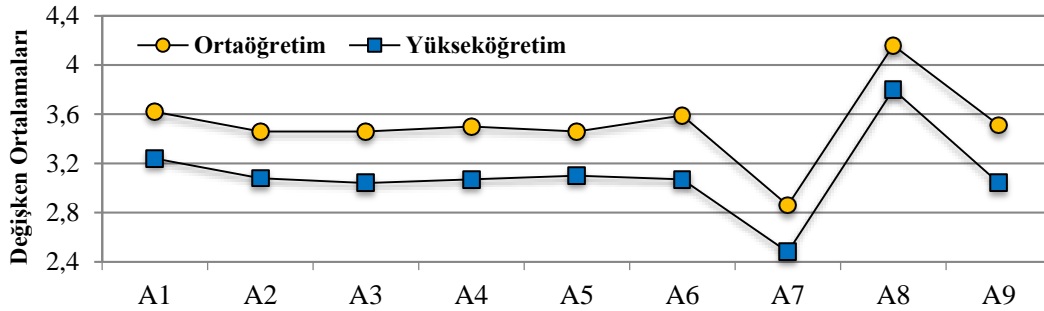
Bağımlı Değişkenler	Eğitim						ANOVA Sonuçları		
	Ortaöğretim		Yükseköğretim		Toplam		F	df	Sig.
	M	SD	M	SD	M	SD			
A1	3,62	0,92	3,24	0,88	3,31	0,90	5,466	1	0,020*
A2	3,46	1,02	3,08	0,82	3,15	0,87	5,731	1	0,018*
A3	3,46	1,02	3,04	0,98	3,12	1,00	5,367	1	0,022*
A4	3,50	1,06	3,07	0,97	3,15	1,00	5,531	1	0,020*
A5	3,46	0,96	3,10	0,96	3,17	0,97	4,169	1	0,042*
A6	3,59	1,09	3,07	1,12	3,16	1,13	6,763	1	0,010*
A7	2,86	1,16	2,48	1,01	2,55	1,05	4,181	1	0,042*
A8	4,16	0,90	3,80	1,31	3,87	1,25	2,562	1	0,111 <sup>ns</sup>
A9	3,51	1,04	3,04	1,06	3,13	1,07	6,044	1	0,015*

Not: \*  $p < 0,05$  ve \*\*  $p < 0,10$  düzeylerinde önemlidir. <sup>ns</sup>:  $p < 0,05$  düzeyinde önemsizdir.

M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

a: Değişken ortalamaları 1'den 5'e doğru sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Biliyorum).

Tablo 6'da verilen farklılıkların grafiksel ifadesi Şekil 3'de verilmektedir.



Not: Değişken ortalamaları 1'den 5'e doğru sıralanmıştır (1: Çok Fazla Biliyorum, 5: Hiç Biliyorum).

**Şekil 3.** Ebeveynlerin eğitimlerine göre çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkındaki bilgi düzeyleri.

Şekil 3'de farklı eğitim düzeyine sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmelerine bakıldığında, birbirine paralel yönde ve belirgin farklılıkların olduğu açıkça görülmektedir. Sonuçta, tüm unsurlar için ilköğretim mezunu ebeveynlerin daha düşük değerleri (olumlu) aldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, "Farklı eğitime sahip ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik bilgi düzeyleri birbirinden farklıdır" hipotezini (H3) desteklemektedir. Buna göre, farklı eğitime sahip ebeveynlerin organik kimyasalları bilme düzeyleri arasında belirgin bir farklılığın olduğu söylenebilir.

Özetle; yukarıdaki verilen ortalama değerlere topluca bakıldığında, katılımcıların çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkında "Birçok plastiğin ölümcül zehirli duman ve gaz açığa çıkardığını biliyorum" unsuru dışında diğer tüm unsurlar için yeterince bilgiye sahip olmadığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri belirlenmiş olup, elde edilen sonuçlar sistematik bir sırayla aşağıda verilmiştir.

Ebeveynlerin cinsiyet durumlarına göre, çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında A1, A7 ve A8 unsurları için  $p < 0,05$  ve  $p < 0,10$  düzeylerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar bulunmuş olunmasına karşın, diğer altı unsur için anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Bu sonuç daha önce Yıldırım ve Ünlü [1] tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarını desteklemektedir.

Ebeveynlerin yaş durumlarına göre, çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında A7 ve A8 unsurları dışında diğer tüm unsurlar için  $p < 0,05$  ve  $p < 0,10$  düzeylerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, 25-45 yaş arasındaki ebeveynlerin, 46 yaş ve üzerindeki ebeveynlere oranla çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkında daha az bilgiye sahip oldukları görülmektedir. Bu sonuca göre, özellikle gençlerin bilgilendirilmesi amacıyla eğitim müfredatında gerekli düzenlemelerin yapılmasında, ayrıca yazılı ve görsel medya aracılığı ile halkın tüm kesimlerinin bilgilendirilmesinde yarar görülmektedir. Bu sonuç daha önce Yıldırım ve Ünlü [1] tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarını desteklemektedir.

Ebeveynlerin eğitim durumlarına göre, çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik değerlendirmeleri arasında A8 unsuru dışında diğer tüm unsurlar için  $p < 0,05$  ve  $p < 0,10$  düzeylerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, ortaöğretimli ebeveynlerin yükseköğretimlilere oranla çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasallar hakkında daha az bilgiye sahip oldukları görülmektedir. Bu sonuç, daha önce Yıldırım ve Ünlü [1] tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarını desteklemektedir.

Yukarıdaki sonuçlar, ebeveynlerin çocuk odası donatı elemanlarından ortama yayılan organik kimyasalların zararlı etkileri hakkında yeterince bilgiye sahip olmadığını göstermektedir. Bu sonuçlardan hareketle, “insanların ruhen ve bedenen sağlıklı kalabilmeleri”, “iç mekân hava kalitesinin en az dış ortam hava kalitesi kadar temiz olması”, “doğal çevreye daha az zarar verilmesi”, “sürdürülebilir bir dünya”, “sağlıklı ve başarılı nesillerin yetiştirilmesi”, “aile bütünlüğünün uzun süre korunabilmesi” ve “mutlu ve huzurlu bir toplum” için iç mekân kirleticilerinin kontrol altına alınması büyük önem taşımaktadır. Bu konuda geliştirilen bazı öneriler aşağıda listelenmiştir.

- Toplumsal bilincin oluşturulması,
- Sosyal ve bilimsel aktivitelerin düzenlenmesi,
- Yetkili kurumların iç mekân kirliliğine neden olan malzeme ve gereçleri belirleyip, sınıflandırarak kamuoyuyla paylaşması,
- İnsan sağlığına verebileceği zararların yazılı ve görsel basında sıklıkla tartışılması,
- Üniversitelerin ilgili bölümlerinin müfredatına alınması ve derslerinde işlenmesi,
- Hazırlanmış normlardan faydalanılarak bu konuda toplumsal bilinç eşiğinin yükseltilmesi,
- Ekonomik destek sağlanması,
- Tüm toplum kesimlerinin kirleticilere yönelik ortak mücadelesi için elbirliği ve takım ruhu içinde hareket edilebilmesi gerekir.

Özetle, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki ilişki ne kadar artarsa o oranda iç mekân kirleticisinin açığa çıktığı görülmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kullanımı ve bunlara kaynak oluşturacak malzeme üretimi önem kazanmaktadır. Bina ve iç donatı elemanlarında organik kimyasallar içeren malzemelerin kullanılmasında en önde gelen neden, ucuz ve kolay inşa edilebilir olmalarıdır. Ortama gaz yaymaları ve sağlığı etkileme düzeyleri, kullanım miktarı ve sıcaklığın artışıyla doğrudan ilişkilidir. Sağlığa zararlı etkilerini azaltmak için organik kimyasal içeren maddelerin kullanımını azaltmak gerekmektedir. Bu malzemelerin kullanımının denetlenmesi, tasarımcı, kullanıcı ve üretici firmaların konuya ilişkin bilinçlendirilmesinde büyük yarar vardır. Ayrıca, ülkemizde bu konuda yasal boşlukların tanımlanıp, caydırıcı yaptırımların uygulanmaya konulması çok büyük katkı sağlayacaktır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Değerli katılımcılara zaman ayırıp, araştırma anketini doldurdıkları için çok teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yıldırım, K., Ünlü, F. Determination of Users' Knowledge on the Impact of Organic Chemicals in Interior Equipment Elements on Health: Ankara/Turkey Sample. *Open Environmental Sciences*, 7(1), 32-40, (2013).
- [2] Kurtoglu, A., Koç. H. Mobilya Endüstrisinde Standardizasyon ve Kalite. *Mobilya-Dekorasyon Dergisi*, Mayıs-Haziran, s. 12, s. 8-19, (1996).
- [3] Demirarslan, D., Aytöre, S. (2014). Çocuğun Fiziksel ve Ruhsal Gelişimi Açısından Çocuk Odaları Tasarımında Malzeme Kullanımı ve Malzeme Seçiminin Önemi, 2. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, September 6-8, Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi.
- [4] Tavşan, F. (1995). *Trabzon Konutları Üzerinde Çocuk Odaları Mekân ve Donatı Özellikleri Üzerine Bir Araştırma*. Y.L. Tezi, KTÜ, FBE.
- [5] Burdurlu, E., Kılıç, Y., İlçe, A.C., Elibol, G.C., Yener, G. Okul Öncesi Çocuk Mobilyaları İle İlgili Ebeveyn Görüşleri ve Öngörülen Mobilya Tasarım Ölçütleri, *Teknoloji*, Cilt 7, Sayı 1, 139-149, (2004).
- [6] Wan, C.M., Jiao Chen, J., Toppinen, A. Consumers' Environmental Perceptions of Children's Furniture in China. *Forest Products Journal*. Vol. 65, No. 7-8, 395-405, (2015).
- [7] Ruth, L.C. (2000). *Design Standards for Children's Environments*. McGraw-Hill, 860 Taylor Station Rd., Blacklick, OH 43004-0545.
- [8] Toivonen, R. M. Product quality and value from consumer perspective—An application to wooden products. *Journal of Forest Economics*, 18(2), 157-173, (2012).
- [9] Aksakal, F.N., Vaizoğlu S.A., Güler, Ç. Mobilyalardaki Kimyasallar ve Sağlık Etkileri (Chemicals in Furnitures and Their Effects on Health), *Sted*, cilt 14, sayı 12, 268-272, (2005).
- [10] Thiermeyer M. (1994). *Klimazone*. AİT 10.198.
- [11] Pearson D. (1989). *The Natural House Book*. London: Conran Octopus Limited.
- [12] Yıldırım K. Bitkilerin İç Mekân Kirleticileri Üzerindeki Etkileri: *İçmimar Dergisi*, 107-115, (2013).
- [13] Tecer LH. Hava Kirliliği ve Sağlığımız. *Bilim ve Aklın Aydınlığında Eğitim*;135:15-29, (2011).
- [14] Ohura, T., Amagi, T., Shen, X Li., Zhang, P., Zhu, L. Comparative Study on Indoor Air Quality in Japan and China: Characteristics of Residential Indoor and Outdoor VOCs. *Athmospheric Environment*. 43 (40): 6352-6359, (2009).
- [15] Vaizoğlu, S.A., Tekbaş Ö.F., Evcı D. Kapalı Ortam Hava Kalitesi Sağlığa Etkisi, *Sted*. 1-5, (2000).
- [16] Wolverton, B.C, Kozaburo, T. (2010). *Plants: Why You Can't Live Without Them*. New Delhi: Roli Books.
- [17] Wolverton, B.C. (1997). *Eco-Friendly Houseplants*. London: Weidenfeld & Nicolson 1996. Released in U.S. as How To Grow Fresh Air. New York: Penguin Books.
- [18] Wolverton, B.C, Wolverton, J.D. (1996). *Interior Plants: Their Influence on Airborne Microbes Inside Energy-Efficient Buildings*. *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*. 41(2): 99-105.

- [19] Wolverton, B.C., Wolverton, J.D. Plants and Soil Microorganisms - Removal of Formaldehyde, Xylene and Ammonia from the Indoor Environment. *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*. 38(2):11-15, (1993).
- [20] Wolverton, B.C., Wolverton, J. (1992). Bioregenerative Life Support Systems for Energy-Efficient Buildings. *Proceedings of International Conference of Life Support and Biospherics*. Huntsville, Alabama.
- [21] Wolverton, B.C., Johnson, A, Bounds, K. (1989). Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement. *NASA/ALCA Final Report, Plants for Clean Air Council*, Davidsonville, Maryland.
- [22] Wolverton, B.C., McDonald, R.C., Mesick, H.H. Foliage Plants for the Indoor Removal of the Primary Combustion Gases Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides. *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*. 30:1-8, (1985).
- [23] Wolverton, B.C., McDonald, R.C., Watkins, Jr. E.A. Foliage Plants for Removing Indoor Air Pollution from Energy-Efficient Homes. *Economic Botany*. 38(2): 224-228, (1984).
- [24] Ünlü, F., Yıldırım, K. Exploring the Knowledge Level of Interior Architecture and Environmental Design Students on Indoor Air Pollutants. *MEGARON*, 10(4), 622-636, (2015).
- [25] Çelebi Yazıcıoğlu, N.M., Yıldırım, K., Kılıç, N.P. A Study on Determining the Criteria that Parents Consider When Buying Children xxs Room Furniture. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*. Vol. 6, no. 4, pp. 81–91, (2019).
- [26] Yıldırım, K, Günçaktı, M, Çelebi Yazıcıoğlu, N. Farklı Sosyo-Ekonomik Düzeye (SED) Sahip Konut Kullanıcılarının İç Mekân Donatılarını Değiştirme Süreçlerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (1) , 40-50, (2020).
- [27] Panayides, P. Coefficient alpha: Interpret with caution. *Europe's Journal of Psychology*. 9 (4), 687-696, (2013).
- [28] Kaplan, R. M., Saccuzzo, D. P. (2009). *Psychological Testing: Principles, Applications, and Issues*. Boston, MA: Cengage Learning.

## Thermal Behaviors of Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids

İpek AYTAÇ 

University of Turkish Aeronautical Association, Department of Mechanical Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 22/06/2020

Revision: 21/08/2020

Accepted: 24/09/2020

#### Highlights

- Hybrid nanofluids.
- Thermophysical property
- Different concentrations

#### Keywords

Nanofluid  
Nanoparticle  
Thermophysical  
Thermal performance  
Hybrid

In this study, the thermophysical properties of nanofluids obtained by adding certain ratios to the pure water such that CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles were determined theoretically using the models in the literature. Thermal conductivity, specific heat, viscosity values of nanofluids with different concentrations such as 0.5%, 1%, 2% and 2.5% were calculated and the models were compared.

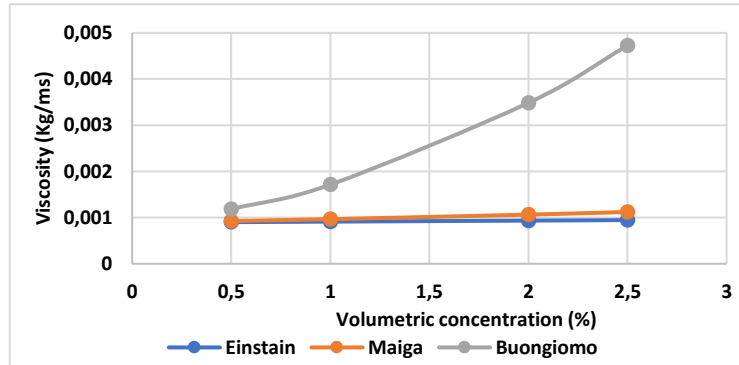


Figure A. Comparison of the viscosity values of nanofluids with literature models

**Purpose:** In this study, it is aimed to theoretically determine the thermophysical properties of nano fluids obtained by adding certain ratios of CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles to pure water using models in the literature. Thermal conductivity, specific heat, viscosity values of nanofluids with different concentrations were calculated and made comments about the models by comparing the obtained results.

**Theory and Methods:** Hybrid nanofluids are an extension of mono nanofluids, obtained by suspension of hybrid nanoparticles in a basic liquid. Thermophysical properties of nanofluids and source research has been done. In order to determine the thermal behavior, models developed for thermophysical properties in the literature were examined.

**Results:** The results have shown that the heat holding and carrying capacity of metal oxides in nanofluids is higher than pure water. It has been observed that the thermal conductivity of the oxide and hybrid nanofluids is greater than the thermal conductivity of the base fluid at all mixing ratios. According to the results, when the volumetric concentration of nanofluids increases, specific heat values decrease in all models used.

**Conclusion:** In this study, thermophysical properties of nanofluids obtained by adding CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles into pure water in certain proportions were theoretically determined using the models in the literature.

It has been observed that the efficiency of these systems will be much higher by using nanofluids, whose thermophysical properties are superior to pure water, in thermal systems such as heat pipes and heat exchangers.



## Hibrit Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Isıl Davranışları

İpek AYTAÇ

*University of Turkish Aeronautical Association, Department of Mechanical Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA*

### Öz

Nano boyutta metal oksit parçacıklar içeren nanoakışkanlar ve hibrit nanoakışkanların ısı sistemlerinde çalışma akışkanı olarak kullanıldıklarında geleneksel akışkanlara göre ısı iletkenlik bakımından daha üstün performans sergiledikleri bilinmektedir. Çalışma akışkanlarının ısı ve fiziksel özellikleri birçok ısı ve akış problemlerinin çözümünde önemli parametreler olarak yer alır. Bu çalışmada CuO, ZnO, MgO parçacıkları ve CuO+ZnO, MgO+CuO, MgO+ZnO hibrit parçacıklarının nano boyutta olacak şekilde saf su içerisine belirli oranlarda katılarak elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özellikleri teorik olarak literatürdeki modeller kullanılarak belirlenmiştir. %0.5, %1, %2, %2.5 olacak şekilde farklı konsantrasyona sahip nanoakışkanların ısı iletkenlik, özgül ısı, viskozite değerleri hesaplanmış ve modeller karşılaştırılmıştır.

### Thermal Behaviors of Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids

#### Abstract

Nanofluids and hybrid nanofluids containing nano-sized metal oxide particles are known to perform better in terms of thermal conductivity when used as working fluids in thermal systems. The thermal and physical properties of working fluids are important parameters in the solution of many heat and flow problems. In this study, the thermophysical properties of nanofluids obtained by adding certain ratios to the pure water such that CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles are nano-sized were determined theoretically using the models in the literature. Thermal conductivity, specific heat, viscosity values of nanofluids with different concentrations such as 0.5%, 1%, 2% and 2.5% were calculated and the models were compared.

#### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 22/06/2020*  
*Düzeltilme: 21/08/2020*  
*Kabul: 24/09/2020*

#### Anahtar Kelimeler

*Nanoakışkan*  
*Nanoparçacık*  
*Termofiziksel*  
*Isıl performans*  
*Hibrit*

#### Keywords

*Nanofluid*  
*Nanoparticle*  
*Thermophysical*  
*Thermal performance*  
*Hybrid*

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji yaşamın her aşamasında gerekli olan temel bir ihtiyaç konumundadır. Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile hem sanayi sektöründe hem de günlük yaşamın her noktasında enerjiye olan talep artmaktadır. Enerjiyi bir yerden bir yere transfer etmek için ısı boruları, ısı eşanjörleri gibi sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ısıyı taşımakla görevli çalışma akışkanları olarak su, yağ ve etilen glikol gibi geleneksel sıvılar kullanılmaktadır.

Isıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan akışkanların ısı performansını etkileyen en önemli parametreler ısı iletkenlik, özgül ısı kapasitesi, viskozite vb. termofiziksel özelliklerdir. Saf su gibi yaygın geleneksel çalışma akışkanlarının ısı iletkenliğinin düşük olması nedeniyle ısı sistemlerinin performansında istenilen başarı sağlanamamaktadır. Isıl sistemlerde verimin artırılabilmesi amacıyla nano boyutta parçacıkların temel akışkan içerisine eklenerek oluşturulan nanoakışkanlar ile ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Günümüzde nano parçacıkların ısı transferi iyileştirmesi ile ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir. Nanoakışkanların ısı transferi performansının iyileşmesini sağlayan bir takım fiziksel olaylar vardır. Katı metalin ısı iletkenliği baz akışkanından fazla olduğu için baz akışkan içerisine süspansiyon olarak katılan ince katı metaller, akışkanın ısı iletkenliğini artırmaktadır. Çalışma akışkanının içine süspansiyon edilen metal partiküller akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini artmasını sağlar. Parçacıklar

arasındaki etkileşim ve çarpışmalar sayesinde akışkanın yüzey alanda artış olur. Böylece tanecikler arası daha hızlı ısı transferi gerçekleşir.

Choi, nanometre boyutlarında katı partikül içeren çalışma akışkanlarını nano akışkan olarak tanımlayan ilk araştırmacı olarak bilinir. Choi vd., saf su, makina yağı, etilen glikol ve sıvı vakum pompası içine süspanse edilmiş nano parçacıklar kullanarak akışkanların termal iletkenliğini test etmişlerdir ve nano parçacıklı akışkan karışımlarının termal iletkenliklerinin baz sıvısına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [1].

Han vd., çalışma akışkanı olarak farklı derişimdeki  $Al_2O_3$  nanoakışkanı kullanarak, ısı eşansjöründe ısı transferi performansını geliştirmek amacıyla nanoakışkan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Isı transferinin, nano partiküllerin hacim ve sıcaklık konsantrasyonlarındaki artış ile arttığını belirtmişlerdir [2].

Ardekani vd., iki farklı nanoakışkan kullanarak, nanoakışkanların ısı aktarım özelliklerini türbülanslı akış için deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoparçacık hacim konsantrasyonu gibi geometrik parametrelerin akıştaki etkilerini araştırmışlardır. Nanoakışkanların viskozitesini ve ısı iletkenliğini farklı hacimlerde ve sıcaklıklarda deneysel olarak gözlemlemişlerdir [3].

Teng vd., nanoakışkan ile şarj edilmiş ısı borusunun ısı veriminin artırılmasını incelemişlerdir. Çalışma akışkanının şarj miktarının, ısı borusunun eğim açısının ve nano partiküllerin ağırlık oranlarının, ısı borusunun ısı verimi üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, ısı borusunun optimum koşulu nano parçacıkların %1 derişimde iken olduğunu gözlemlemişlerdir [4].

Anitha vd.,  $(Al_2O_3+Cu)/su$  hibrit nanoakışkanının nanoparçacık hacim konsantrasyonunun, ısı eşanjörlerinde ısı transfer performansına etkisini araştırmışlardır. Hibrit nanoakışkan kullanılan sistemler için geleneksel akışkanlara oranla, yüksek ısı transfer performansı elde edilebileceğini belirtmişlerdir [5].

Sundar vd., su ve etilen glikolü temel akışkan olarak kullanmış ve içerisine  $GrO$  ve  $Co_3O_4$ 'den oluşan hibrit nanoparçacıkların eklenmesi ile hazırlanan nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini araştırmışlardır [6].

Murshed vd.,  $TiO_2$  nanoparçacıkları içeren ve temel akışkanı silikon yağı olan nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoakışkanın viskozitenin hacim konsantrasyonunun artışı ile arttığını, ancak artan sıcaklıkla da doğrusal olmayan bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir [7].

Turgut vd., %3 hacimsel konsantrasyonlu  $TiO_2$  – su nanoakışkanının 13-55 °C sıcaklık aralığında ısı iletkenlik ve viskozitede olan değişimi araştırmışlardır. Sonuçlar, termal iletkenliğin partikül hacminin artışıyla arttığını aynı zamanda viskozitede de artışın çok fazla olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, nanoakışkan viskozitesindeki artışın ısı iletkenlikteki artıştan çok daha fazla olduğunu böylece pompalama maliyetinin de artacağını göstermişlerdir. Sıcaklığın artması ile viskozitenin azaldığını belirtmişlerdir [8].

Ghasemi vd., yaptıkları çalışmada  $CuO$  nano parçacıklarının kütle konsantrasyonunun ve sıcaklığın sıvı parafin bazlı nanoakışkanın dinamik viskozitesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoparçacık derişimin artmasıyla, nanoakışkanın dinamik viskozitesinin temel akışkana göre arttığını ve sıcaklığın artması ile de nanoakışkanın viskozitesinin önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir [9].

Tiwari vd.,  $CeO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  ve  $SiO_2$  nano parçacıkları içeren nanoakışkanlar kullanarak deneysel olarak ısı transferi performanslarını karşılaştırmışlardır. Baz akışkan üzerindeki en yüksek ısı transferi değerini elde etmek amacıyla optimum parçacık konsantrasyonları belirlemişlerdir. Çalışmada,  $CeO_2/su$  nanoakışkanının, çalışılan nanoakışkanlar içinde daha düşük optimum konsantrasyonla en iyi performansı verdiğini belirtmişlerdir [10].

Onyiriuka vd., bu çalışmada, mango kabuğundan yapılan yeni bir nano-sıvı sınıfının ısı transferi özelliklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak, nanoakışkanın ısı transfer katsayısının temel akışkaninkinden yaklaşık iki kat daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [11].

Wang vd., karbon nanotüpten oluşan nanoakışkanın nano parçacık boyutu ve sıcaklığın özgül ısı kapasitesine etkisini araştırmıştır. Özgül ısının belirli bir sıcaklıkta nano parçacık boyut ve şekline bağlı olmadığına sonucuna ulaşmışlardır [12].

Bu çalışmada  $CuO/su$ ,  $ZnO/su$ ,  $MgO/su$ ,  $(MgO+ZnO)/su$ ,  $(CuO+ZnO)/su$  ve  $(MgO+CuO)/su$  hibrit nano akışkanlarının termofiziksel özellikleri olan yoğunluk, özgül ısı, viskozite ve ısı iletkenlik değerlerinin

tespit edilmesi ve literatürdeki modellerin değişen parçacık hacim konsantrasyonuna göre karşılaştırılması amaçlanmıştır. Özgün tarafı; CuO/su, ZnO/su, MgO/su nanoakışkanlar ile (MgO+ZnO)/su, (CuO+ZnO)/su ve (MgO+CuO)/su hibrit nanoakışkanlarının termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan modellerin birlikte karşılaştırılmış olmasıdır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Isı transferi uygulamalarında nanoakışkan kullanılmasının sistemin performansı üzerindeki olumlu etkilerini gören araştırmacılar, baz akışkan içerisine farklı nano parçacık kombinasyonlarını ekleyip kullanmayı denemişlerdir. ZnO, MgO, CuO gibi nanoakışkanlar, düşük yoğunluklu ve yüksek kararlılık sağlayan parçacıkların temel akışkanlar ile oluşturdukları süspansiyonlardır. Bu nano parçacıklar daha düşük maliyetli ve kolay erişilebilir olduklarından dolayı literatürdeki birçok çalışmada yer almaktadır.

Nano parçacıkların termal iletkenliğinde daha fazla iyileştirme, iki veya daha fazla sayıda farklı nano parçacıkların hibrit haline gelmesi ile elde edilebilmekte ve hazırlanan bu yeni bileşik halindeki nanopartiküller, hibrit nanopartiküller olarak adlandırılmaktadır. Hibrit nano parçacıkların sentezlenmesi için kullanılan mekanik ve kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Hibrit nanoakışkanlar, mono nanoakışkanların uzantısı olup hibrit nano parçacıkların temel sıvı içerisinde süspansiyonu ile elde edilir. Hibrit nanoakışkanların kullanmanın asıl amacı, tek çeşit nano parçacık içeren nano akışkanlara göre daha yüksek termal iletkenlik elde edilmesi ile ısı performansında artış sağlanmasıdır.

### 2.1. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve kaynak araştırması (Thermophysical properties of nanofluids and literature research)

Nanoakışkanların ısı iletkenliği, viskozitesi, özgül ısı gibi termofiziksel özellikleri parçacık şekli, parçacık boyutu, hacim oranı, sıcaklık, yüzey aktif maddeler, kayma hızı, partikül toplanması gibi birçok parametre tarafından etkilenmektedir.

Nano parçacıkların fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 2’ de nanoakışkanların fiziksel özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalara genel bir bakış sunulmaktadır. Şekil 1’de ise nano parçacıkların parçacık boyutu dağılım grafiği verilmiştir. Şekil 2’de nano parçacıkların SEM görüntüleri verilmiştir.

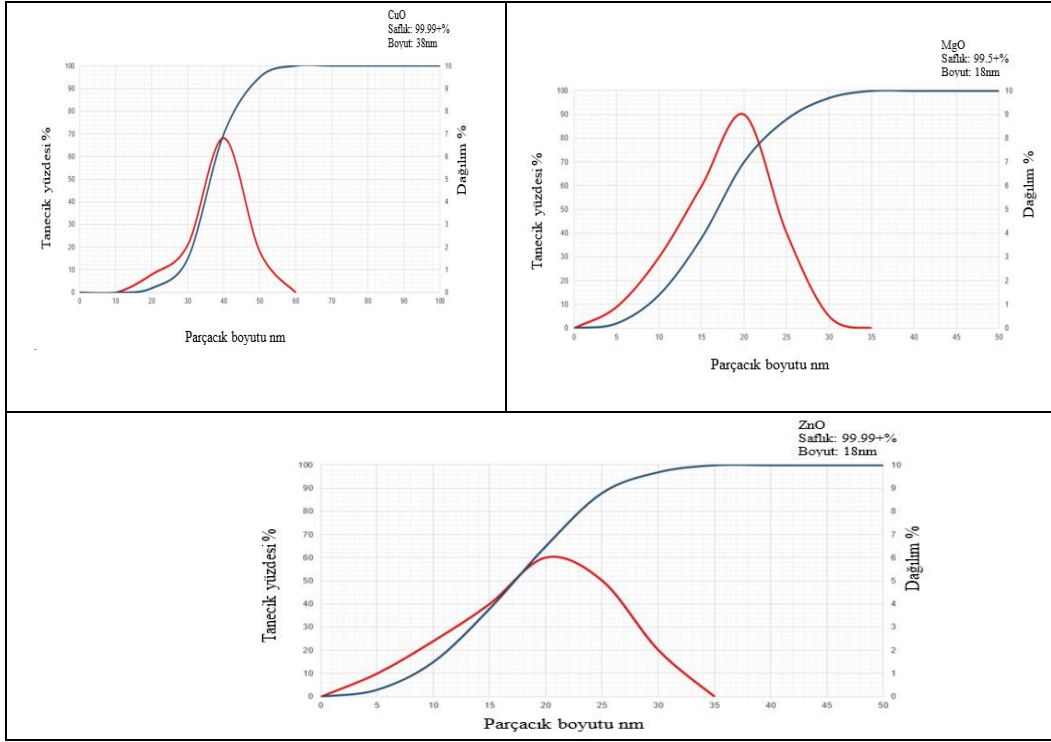
**Tablo 1.** Nano parçacıkların fiziksel özellikleri

Nano parçacık	Safılık (%)	Ortalama parça boyutu (nm)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl iletkenlik (W / mK)	Özgül ısı (J / kgK)
CuO	99.99%	38	6320	32.9	531
ZnO	99.99+%	18	5500	23.4	494
MgO	99.5+%	18	3580	60	877

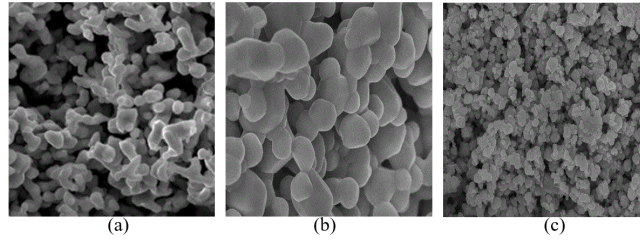


**Tablo 2.** Nanoakışkanlarda Termofiziksel Özellikler Üzerine Yapılan Çalışmalar

YAZAR	KULLANILAN NANOAKIŞKAN	PARAMETRE	ÖZET
Anitha vd. [5]	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Cu)/su	Parçacık hacim konsantrasyonu	Hibrit nanoakışkan kullanılan sistemler için geleneksel akışkanlara oranla, yüksek ısı transfer performansı elde edilebileceği belirtilmiştir.
Ghasemi vd. [9]	CuO/sıvı parafin	Sıcaklık, parçacık hacim konsantrasyonu	Nanoparçacık derişimin artmasıyla, nanoakışkanın dinamik viskozitesinin temel akışkana göre arttığı ve sıcaklığın artması ile de nanoakışkanın viskozitesinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.
Sundar vd. [13]	Hibrit	Parçacık hacim konsantrasyonu, sürtünme faktörü, sıcaklık	Hibrit nanoakışkanların tek tip parçacıklı karışımlardan daha yüksek termal iletkenliğe ve viskoziteye sahip oldukları belirtilmiştir. Ayrıca hibrit nanoakışkanların, diğer çalışma sıvılarından daha yüksek ısı transfer katsayılarına sahip olduğu belirlenmiştir.
Nguyen vd. [14]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /su ve CuO/su	Sıcaklık, parçacık hacim konsantrasyonu, tanecik boyutu	Her iki nanoakışkan için viskozite, hacimsel konsantrasyona bağlı olarak artış göstermiş olup, CuO/Su nanoakışkanının en fazla artış gösterdiği belirlenmiştir.
Pastoriza-Gallego vd. [15]	CuO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu, sıcaklık, parçacık boyutu	Viskozite farklı sıcaklık değerleri ve parçacıkların farklı hacimsel konsantrasyonlarda araştırılmıştır. Ortalama parçacık çapı daha küçük olan nanoakışkanın viskozitesinin, çapı büyük olan nanoakışkana kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
Suganthi vd. [16]	ZnO	Sıcaklık	Nanoakışkanının farklı sıcaklık değerleri arasında viskozitesini araştırılmıştır. Sıcaklık ile viskozitenin ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir.
Saholi vd. [17]	CuO/etilen glikol ve CuO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu	Temel akışkana eklenen nano parçacıkların miktarı arttıkça, termal iletkenlikte de artış meydana geldiği belirtilmiştir. Nanoparçacık miktarı arttıkça zamanla nanoakışkanın kararsız hale gelerek akışkanın termal iletkenliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.
Nadooshan. [18]	ZnO/su ve ZnO/etilen glikol	Parçacık hacim konsantrasyonu	Isıl iletkenliğin, nanopartikül konsantrasyonu arttıkça artış gösterdiği belirtilmiştir.
Kim vd. [19]	ZnO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu, parçacık boyutu	Nanoparçacık boyutunun azalmasıyla, termal iletkenliğin artış gösterdiği belirlenmiştir.
Esfe vd. [20]	(Cu+TiO <sub>2</sub> )/su, MgO/su ve MgO/etilen glikol	Parçacık hacim konsantrasyonu, sıcaklık	Nanoakışkanın ısıl iletkenliğinin, katı hacim konsantrasyonu ve sıcaklığın artması ile arttığı gösterilmiştir.
Efse vd. [21]	MgO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu	Nanoakışkanın basınç düşüşünün temel akışkandan daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Nanoakışkan kullanımının gerekli pompalama gücünde çok büyük miktarlarda artışa neden olmadan ısı transferini arttırdığı gözlemlenmiştir.
Akılı vd. [29]	(TiO <sub>2</sub> +CuO)/etilen glikol	Parçacık hacim konsantrasyonu	Hibrit nanoakışkanların etilen glikol baz akışkanı ile kıyaslandığında ısıl iletkenlikte maksimum artış elde edildiği belirtilmiştir.
Mousavi vd. [30]	(MgO+TiO <sub>2</sub> )/su	Parçacık hacim konsantrasyonu, sıcaklık	Hibrit nanoakışkanların dinamik viskozitesinin sıcaklığın ve hacimsel derişimin artması ile azaldığı belirtilmiştir.



**Şekil 1.** Parçacık boyutu dağılım grafikleri



**Şekil 2.** Nano parçacıkların SEM görüntüleri (a) MgO (b) ZnO (c) CuO (SEM images of nanoparticles (a) MgO (b) ZnO (c) CuO)

### 2.1.1 Isıl iletkenlik (Thermal conductivity)

Akışkan ya da parçacığın ısıyı sıcak bölgeden alıp daha soğuk bölgeye doğru iletebilme kapasitesi ısı iletkenlik olarak tanımlanır. Nanoakışkan kullanmanın nedeni; ısıyı taşıyabilme özelliği daha yüksek olan ısı transfer akışkanı ile çalışma ihtiyacıdır ve nanoakışkanların termal iletkenlik değerleri, süspansiyonların performanslarını göstermeleri açısından oldukça önemlidir. Hibrit nanoakışkanların kullanılmasıyla, tek çeşit nano parçacık içeren nano akışkanlara kıyasla daha yüksek termal iletkenlik elde edilmesi beklenmektedir.

Isı transferi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan nanoakışkanın ısı iletim değeri; nano parçacığın hacim konsantrasyonu, nano parçacık şekli, parçacık boyutu, baz sıvının türü, kararlılık, sıcaklık, pH değeri vb. parametrelere bağlı olarak değişir. Literatüre bakıldığında araştırmacılar tarafından hem oksit hem hibrit nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerine ulaşabilmek için çeşitli teorik çalışmalar yapılmış, birçok model geliştirilmiştir.

1881 yılında Maxwell tarafından oluşturulan ısı iletim modeli, diğerlerine oranla daha büyük parçacıklara sahip katı-sıvı karışımı için öne sürülen ilk modellerden biridir ve küre biçimli nano parçacıkların temel akışkan içindeki süspansiyonu için geliştirilmiştir [14].

**Tablo 3.** Nanoakışkanlar için termal iletkenlik modelleri [22]

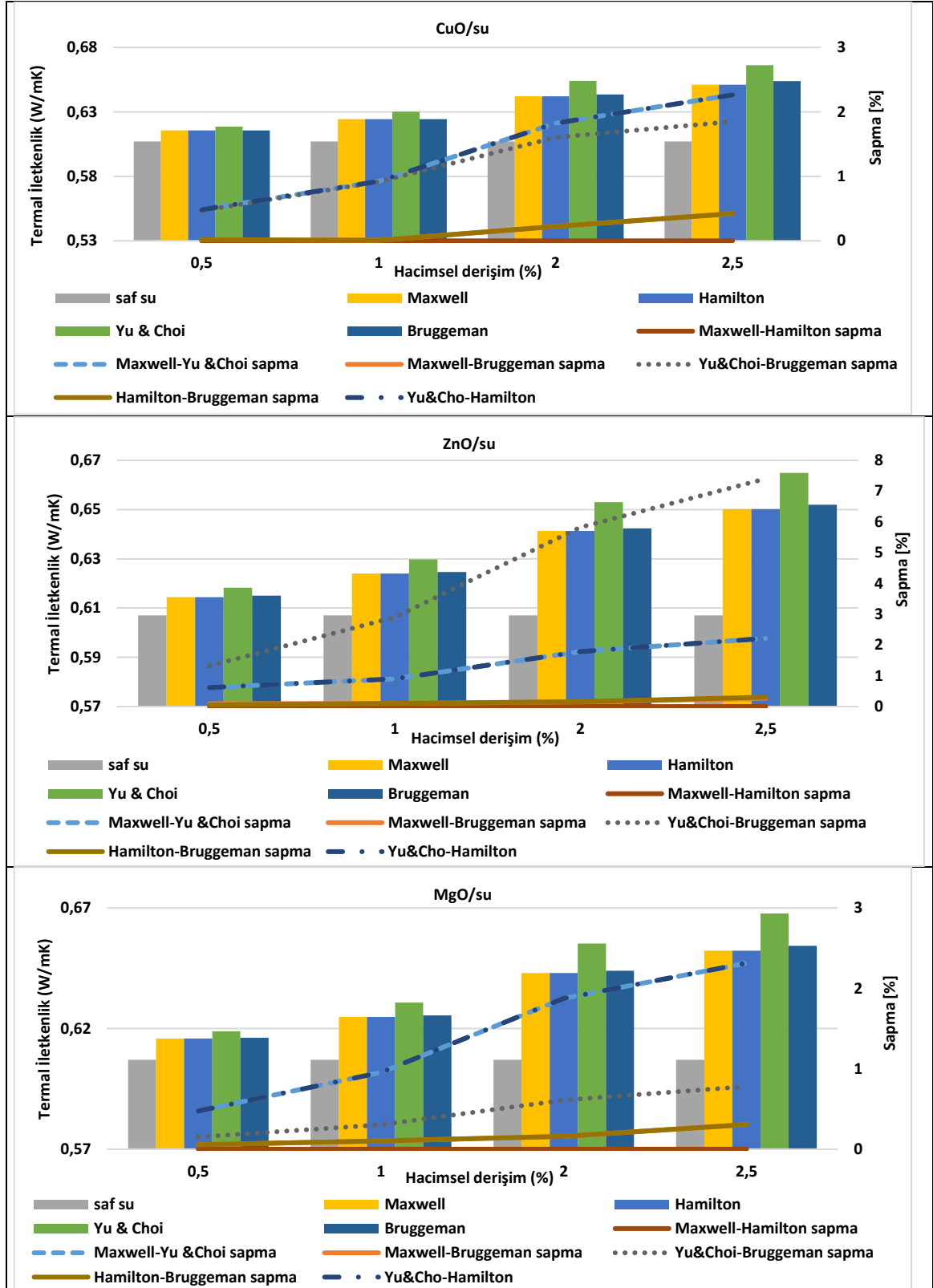
Model	İfade	Açıklama
Maxwell	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - 2(k_p - k_l)\phi}$	Küresel partiküller için geçerlidir.
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + (n-1)k_l - (n-1)(k_l - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_l + (k_l - k_p)\phi}$	Küresel ve küresel olmayan partiküller alınmıştır; küresel partiküller için n=3, silindirik partiküller için n=6
Wasp	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l - 2(k_l - k_p)\phi}{k_p + 2k_l + (k_l - k_p)\phi}$	Katı-sıvı karışımların ısı iletkenliğini hesaplamak için önerilmiştir.
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + (k_p - k_l)(1 + \beta)^3\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)(1 + \beta)^3\phi}$	İki fazlı karışımların etkili ısı iletkenliğini hesaplamak için alternatif bir teordir. $\beta=1$
Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_t] + \frac{k_t}{4}\sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi - 1)^2(k_p/k_t)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p/k_t)]$	Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir.

**Tablo 4.** Hibrit nanoakışkanlar için termal iletkenlik modelleri [23]

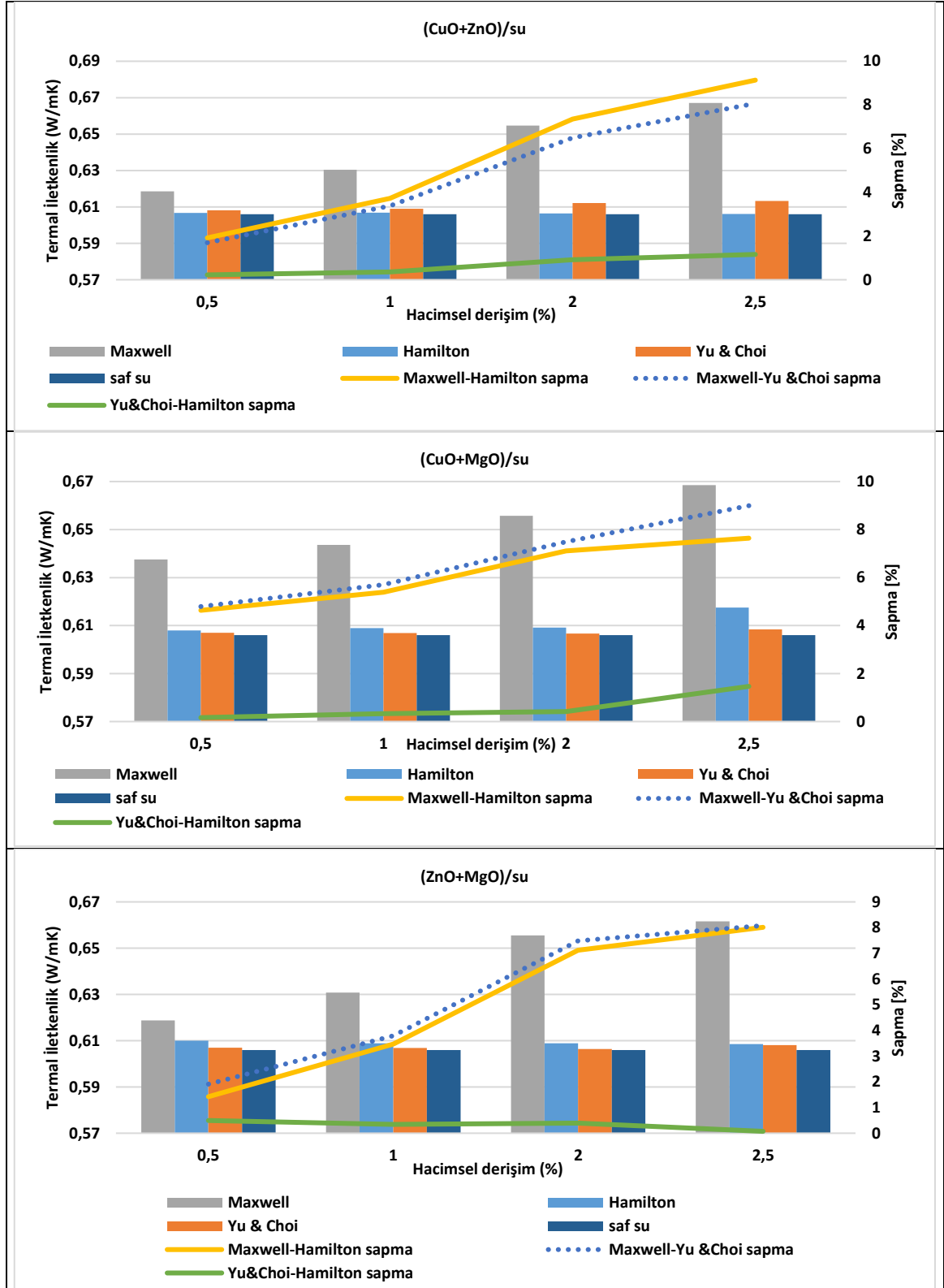
Model	Formülasyon
Maxwell	$k_{hn} = k_b \frac{\left[ \frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})}{\phi_{hnf}} + 2k_b + 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - 2\phi k_b \right]}{\left( \frac{\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{hn}} + 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - k_b \right)}$
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_b} = \frac{\left[ \frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})}{\phi_{hn}} + 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - 2\phi_{hn} \right]}{\left( \frac{\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{hn}} + 2k_b + 2(\phi_{np1}k_{np1} - \phi_{np2}k_{np2}) - \phi_{hn} \right)}$
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_b} = \frac{\left[ \frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})}{\phi_{hn}} + 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})(1 + \beta)^3\phi_{hn} \right]}{\left( \frac{\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{hn}} - 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} - \phi_{np2}k_{np2})(1 + \beta)^3\phi_{hn} \right)}$

Tablo 3 ve 4'teki denklemlerde geçen  $k_e$  karışımın efektif ısı iletkenliği,  $k_{np}$  partikülün ısı iletkenliği,  $k_b$  temel akışkanın ısı iletkenliği,  $\phi$  partikülün hacimsel oranıdır. CuO, ZnO ve MgO nano parçacıklarının saf su ile süspansiyonu ile elde edilen oksit ve hibrit nanoakışkanların hacimsel derişime bağlı olarak hesaplanmış literatür modellerinin termal iletkenlik ve sapma değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Modeller arasındaki ısı iletkenlik sapma değerinin formülü Eşitlik 1' de verilmiştir.

$$\text{Sapma değeri } (\varepsilon_k) = \frac{(\varepsilon_{model1} - \varepsilon_{model2}) \times 100}{\varepsilon_{model1}}$$



Şekil 3. Oksit nanoakışkanların hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış literatür modellerinin termal iletkenlik ve sapma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. Hibrit nanoakışkanların hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış literatür modellerinin termal iletkenlik ve sapma değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3 ve Şekil 4'te %0.5-2.5 hacimsel derişimlere sahip oksit ve hibrit nanoakışkanlarının literatürdeki mevcut modellere göre termal iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Oksit nanoakışkanlarda en yüksek termal iletkenlik Yu & Choi modeline aitken en düşük termal iletkenlik Bruggeman modelinden elde edilmiştir. Maxwell ve Hamilton modellerinden ise birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir.

Partiküllerin hacimsel derişimlerinin artışıyla ısı iletkenlik değeri artmıştır ve nanoakışkanların ısı iletkenlik değeri tüm karışım oranlarında temel akışkan olan saf suyun ısı iletkenlik değerinden fazladır.

Hibrit nanoakışkanlarda en yüksek termal iletkenlik her bir hacimsel derişimde Maxwell modeli ile elde edilmiştir. Literatüre bakıldığında hacimsel konsantrasyonla birlikte hibrit nanoakışkanlarda ısı iletkenlikte de artış sağlanması beklenmektedir [32]. Hibrit nanoakışkanının ısı iletkenliği bütün karışım oranlarında baz akışkanının ısı iletkenliğinden büyük olduğu gözlemlenmiştir.

### 2.1.2 Özgöl Isı Kapasitesi (Specific Heat Capacity)

Nanoakışkanlar için özgöl ısı; bir gram nanoakışkanın sıcaklığını 1 santigrat derece kadar arttıracak olan sıcaklık değeridir. Özgöl ısı kapasitesi ve yoğunluk, nanoakışkanlarda taşınım ile ısı transferini iyileştirmede, ısı depolamada ve ısı transfer hızını etkilemede önemli bir yere sahiptir. Özgöl ısının düşük olması, sıcaklığı artırmak için daha az enerji tüketimi yapılacak olduğunun göstergesidir. Nanoakışkanların özgöl ısı değerlerini elde edebilmek için literatürdeki geliştirilen modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller Tablo 5' te ve Tablo 6' da verilmiştir.

**Tablo 5.** Nanoakışkanlar için özgöl ısı modelleri [24]

Model	Formülasyon
Xuan ve Roetzel	$c_{p\text{nanoakışkan}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho c_p)_{\text{bazakışkan}} - \varphi(\rho c_p)_{\text{nanopartikül}}}{(1 - \varphi)(\rho)_{\text{bazakışkan}} + \varphi(\rho)_{\text{nanopartikül}}}$
Pak ve Cho	$c_{p\text{nanoakışkan}} = \varphi(c_p)_{\text{partikül}} + (1 - \varphi)(c_p)_{\text{bazakışkan}}$

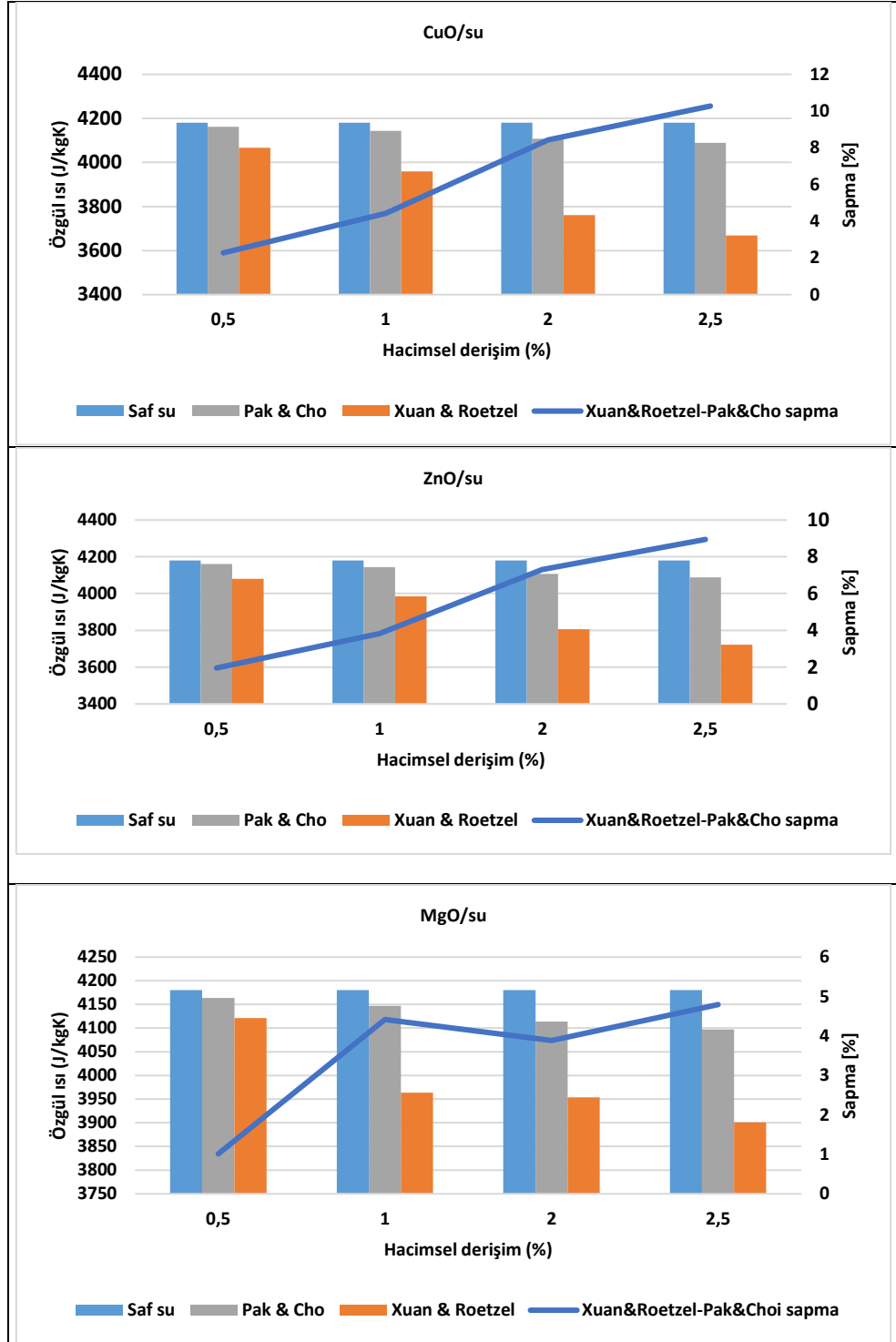
**Tablo 6.** Hibrit nanoakışkanlar için özgöl ısı modelleri [25]

Model	Formülasyon
Xuan ve Roetzel	$c_{phn} = (1 - \varphi)(c_p)_{cp\text{baz}} + \left(\frac{\varphi_{np1}}{2} \times c_{pnp1} + \frac{\varphi_{np2}}{2} \times c_{pnp2}\right)$
Pak ve Cho	$c_{phn} = [\varphi_{np1} c_{p, np1} + \varphi_{np2} c_{p, np2} + (1 - \varphi_{np1} - \varphi_{np2}) \rho_{\text{baz}} c_{\text{baz}}] / \rho_{hn}$

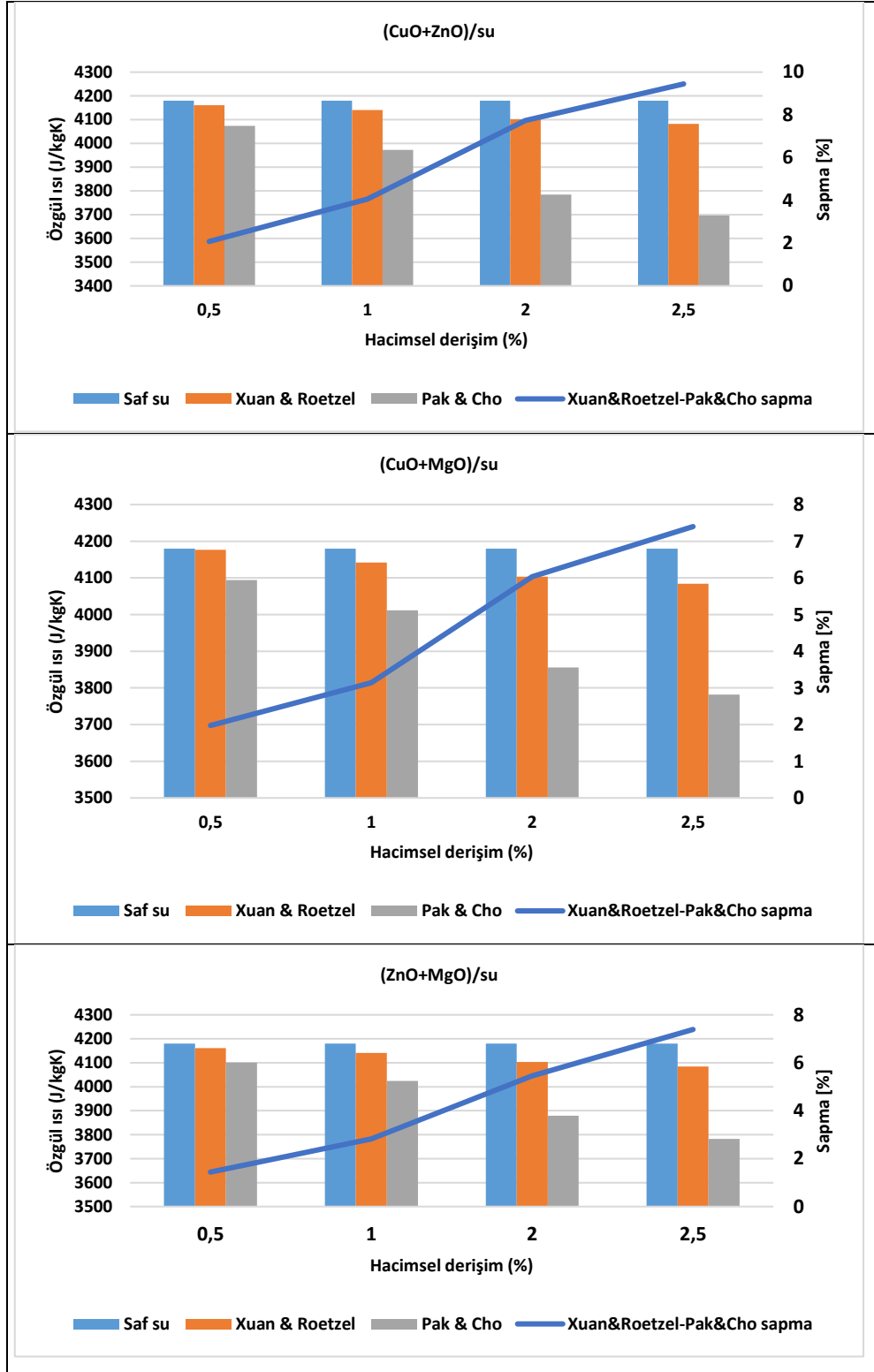
CuO, ZnO ve MgO nano parçacıklarının saf su ile süspansiyonu ile elde edilen oksit ve hibrit nanoakışkanların parçacık hacim konsantrasyonuna göre değişen özgöl ısı değerleri ve sapma değerlerinin literatür modellerinin karşılaştırılması Şekil 5 ve Şekil 6' da verilmiştir. Modeller arasındaki özgöl ısı sapma değeri formülü Eşitlik 2' de verilmiştir.

$$\text{Sapma değeri } (\varepsilon_{cp}) = \frac{(\varepsilon_{\text{model1}} - \varepsilon_{\text{model2}}) \times 100}{\varepsilon_{\text{model1}}} \quad 2$$

Şekil 5 ve Şekil 6' da %0.5-2.5 hacimsel derişimlere sahip oksit ve hibrit nanoakışkanlarının literatürdeki Pak&Cho ve Xuan&Roetzel modellerine göre özgöl ısı değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Oksit ve hibrit nanoakışkanlarının özgöl ısısının bütün karışım oranlarında baz akışkanın özgöl ısısından küçük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre kullanılan bütün modellerde nanoakışkanların hacimsel derişimi arttığında özgöl ısı değerleri azalmaktadır. Literatüre bakıldığında hacimsel konsantrasyonla birlikte hibrit nanoakışkanlarda özgöl ısıda azalma sağlanması beklenmektedir [32].



*Şekil 5. Oksit nanoakışkanların özgül ısı ve sapma değerlerinin hacimsel derişime bağılı olarak hesaplanmış literatür modellerinin karşılaştırılması*



Şekil 6. Hibrit nanoakışkanların özgül ısı ve sapma değerlerinin hacimsel derişime bağılı olarak hesaplanmış literatür modellerinin karşılaştırılması

### 2.1.3 Viskozite (Viscosity)

Viskozite akışkanın akmaya gösterdiği iç dirençtir. Nanoakışkanlarda, zorlanmış taşınım esnasında basınç düşüşünü etkilemesi sebebiyle uygulamalarda ısı transferini iyileştirmekte kullanılan en etkili parametrelerden biri viskozitedir. Nano parçacıkların temel akışkana eklenmesiyle sıvının viskozite



değerinde bir takım değişimler meydana gelir. Viskozite değeri, ihtiyaç duyulan pompalama gücünü de doğrudan etkilediği için verimlilik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Basınç düşüşü viskozite ile ilgili olduğundan, basınç düşüşünün artmasıyla pompalama gücü ihtiyacı da artar. Sıcaklık, kayma gerilimi, nano parçacıkların boyutu, kararlılığı artırmak için kullanılan yüzey aktifleştirici madde eklenmesi ve temel akışkanın cinsi viskoziteyi etkilemektedir. Örneğin akışkanların ısıtılıp sıcaklığının artması ile moleküllere enerji verilir ve moleküllerin gelişigüzel hareketi olan Brownian hareketi artar bununla birlikte molekülleri bir arada tutan Van der waals çekim kuvvetlerinin etkisi azalır. Sonuç olarak akışkanın kayma gerilmesine karşı gösterdiği direnç azalır ve viskozite değeri düşer [27].

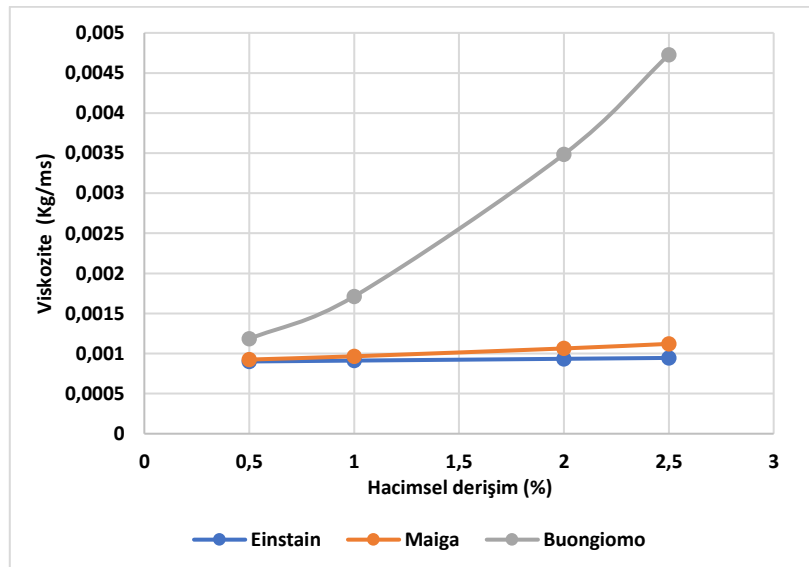
Viskoziteye etki eden diğer bir etken de nanoparçacık hacimsel konsantrasyonudur ve konsantrasyon arttıkça viskozite değerinin de arttığı ortaya çıkmıştır [31]. Literatüre bakıldığında, nanoakışkanların viskozite değerlerine ulaşabilmek için araştırmacılar tarafından çeşitli teorik çalışmalar yapılmış ve modeller geliştirilmiştir. Einstein, çok küçük hacimsel oranlardaki küresel parçacıklar için bir model geliştirmiştir. Bu modeller Tablo 7’de verilmiştir. Şekil 7’de nanoakışkanların viskozite değerlerinin literatür modellerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Nanoakışkanların viskozitesi üzerine az sayıda çalışma yapılmış olsa da bu termofiziksel özellik ısı iletkenliği kadar önemlidir çünkü akış ve ısı transfer özelliklerini etkileyebilmektedir.

Şekil 7 Einstein, Maiga ve Buongiorno modellerinin farklı derişimlerdeki viskozite değişimini göstermektedir.

**Tablo 7.** Nanoakışkanlar için viskozite modelleri [26]

Model	Formülasyon
Einstein	$\frac{\mu_{nanoakışkan}}{\mu_{bazakışkan}} = 1 + 2.5\phi$
Maiga	$\mu_{nanoakışkan} = \mu_{bazakışkan}(1 + 7.3\phi + 123\phi^2)$
Buongiorno	$\mu_{nanoakışkan} = \mu_{bazakışkan}(1 + 39.11\phi - 533.9\phi^2)$



**Şekil 7.** Nanoakışkanların viskozite değerlerinin literatür modellerinin karşılaştırılması

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Nano parçacıklar, ısı sistemlerinin efektifliğinde performans sağlayan yeni nesil nano teknoloji ürünü malzemelerdir. Nano parçacıklar çok küçük boyutlu olduklarından, gerekli koşulların da sağlanmasıyla kullanıldıkları sistemlerde üstün performans göstermektedirler [28]. Bu çalışmada CuO, ZnO, MgO metal oksit parçacıkları ve 1:1 oranında karışımla elde edilen CuO+ZnO, MgO+CuO, MgO+ZnO hibrit parçacıkları nano boyutta olacak şekilde hazırlanan ve saf su içerisine belirli oranlarda katılarak nanoakışkanlar elde edilerek literatürdeki modellere göre termofiziksel özellikleri teorik olarak belirlenmiştir ve bu modeller arasındaki sapma değerleri hesaplanarak modeller arası karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 8 ve Tablo 9’ da oksit ve hibrit nanoakışkanlar için literatür modellerinin hacimsel derişime bağlı olarak hesaplanmış termal iletkenliklerinin sapma değerleri görülmektedir. Bu sapma değerleri modellerden elde edilen sonuçlar arasındaki farkı belirtiyor olup hangi modelin daha gerçekçi sonuç vereceği hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 8’deki oksit nanoakışkanlarda modeller arasındaki farkın değerlendirildiği sapma değerlerine bakıldığında her bir derişimde Maxwell ve Hamilton modelleri ile birbirine çok yakın sonuçlar alındığı açıkça gözükmektedir. En düşük sapma değerine sahip olan bu modeller literatürde de en çok tercih edilen modellerdir [37]. Mousavi vd. yaptıkları çalışmada deneysel verilerle uyumlu olan bu modellerin termal iletkenlik hesabında kullanılabilirliğini göstermişlerdir [30].

Tablo 9’daki hibrit nanoakışkanlarda modeller arasındaki farkın değerlendirildiği sapma değerlerine bakıldığında her bir derişimde Yu&Cho ve Hamilton modelleri ile en düşük sapma değerlerinin elde edildiği gözükmektedir. En düşük sapma değerine sahip olan bu modeller literatürde de en çok tercih edilen modellerdir. Chandrasekar vd. yaptıkları çalışmada ısı iletkenlik hesabında deneysel veriler ile Maxwell ve Hamilton modellerini karşılaştırmış ve bu modellerden faydalanılabileceğini belirtmişlerdir [31]. Avsec vd. istatistiksel nanomekanik temelinde nanoakışkanlar için termal iletkenlik, viskozite ve termodinamik özelliklerin hesaplanması ile ilgili olan çalışmalarında bu modelleri kullanmış olup, sonuçlar ile deneysel verileri karşılaştırmış ve nispeten benzer veriler elde etmişlerdir [33].

Şekil 4 ve Şekil 3’deki oksit ve hibrit nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri kıyaslandığında bariz bir fark görülmemektedir. Hacimsel derişim artarken her bir modelde termal iletkenlikte artış sağlanmıştır. Takabi vd. ısı transfer performansının hibrit nanoakışkan kullanılarak artırılması ile ilgili araştırmalarında ısı iletim katsayısı gibi termofiziksel özelliklerin belirlenmesinde bu modellerin, özellikle hacimsel derişim artarken hibrit akışkanları küçümsediğini deneysel sonuçlarla ortaya koymuşlardır ve hibrit nanoakışkanlar için kullanılan modellerin geliştirilmesi gerektiği üstünde durmuşlardır [36].

Chandrasekar vd. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanların termal iletkenliği ve viskozitesi için iyi kurulmuş Maxwell ve Einstein modellerine başvurmadan önerilen diğer modeller için, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, bu modellerle hesaplanan termal iletkenlik ve viskozite modelleri, hacim konsantrasyonları sırasıyla %3 ve %5 olduğunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanın termal iletkenlik ve viskozitesinin tahmini için kullanılabilir olduğunu açıklamışlardır. Einstein dışındaki viskozite modelleri için, sıvı/parçacık özellikleri açısından korelasyonlar geliştirilerek daha da geliştirilebileceğini belirtmişlerdir [31].

Şekil 5 ve Şekil 6’da verilen oksit ve hibrit nanoakışkanların özgül ısı değerlerine bakıldığında oksit nanoakışkanlarda Pak & Cho modelinden daha yüksek değerler elde edilirken hibrit nanoakışkanlarda Xuan & Roetzel modelinde daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. Öcal S., yaptığı deneysel çalışmada Pak & Cho ve Xuan & Roetzel modellerini deney sonuçlarıyla kıyaslamış ve birbirine yakın değerler bulmuştur [34].

**Tablo 8.** Oksit nanoakışkanlar için literatür modellerinin hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış termal iletkenliklerinin sapma değerleri

Derişim	Akışkan	Model	Maxwell	Hamilton	Yu&Cho	Bruggeman
%0.5	CuO/su	Maxwell	0	0	%0.5	%0.02
		Hamilton	0	0	%0.5	%0.02
		Yu&Cho	%0.5	%0.5	0	%0.5
		Bruggeman	%0.02	%0.02	%0.5	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%0.6	%0.09
		Hamilton	0	0	%0.6	%0.09
		Yu&Cho	%0.6	%0.6	0	%1.3
		Bruggeman	%0.09	%0.09	%1.3	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	%0.5	%0.06
		Hamilton	0	0	%0.5	%0.06
		Yu&Cho	%0.5	%0.5	0	%0.2
		Bruggeman	%0.06	%0.06	%0.2	0
%1.0	CuO/su	Maxwell	0	0	%0.9	%0.01
		Hamilton	0	0	%0.92	%0.01
		Yu&Cho	%0.9	%0.92	0	%0.91
		Bruggeman	%0.01	%0.01	%0.91	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%0.9	%0.1
		Hamilton	0	0	%0.9	%0.1
		Yu&Cho	%0.9	%0.9	0	%2.9
		Bruggeman	%0.1	%0.1	%2.9	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	1%	%0.1
		Hamilton	0	0	1%	%0.1
		Yu&Cho	1%	1%	0	%0.3
		Bruggeman	%0.1	%0.1	%0.3	0
%2.0	CuO/su	Maxwell	0	0	%1.8	%0.2
		Hamilton	0	0	%1.8	%0.2
		Yu&Cho	%6.5	%0.9	0	%1.6
		Bruggeman	%0.2	%0.2	%1.6	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%7.5	%0.1
		Hamilton	0	0	%0.4	%0.1
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0	%5.8
		Bruggeman	%0.1	%0.1	%5.8	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	%7.5	%0.2
		Hamilton	0	0	%0.4	%0.2
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0	%0.6
		Bruggeman	%0.2	%0.2	%0.6	0
%2.5	CuO/su	Maxwell	0	0	%2.3	%0.4
		Hamilton	0	0	%2.3	%0.4
		Yu&Cho	%2.3	%2.3	0	%1.8
		Bruggeman	%0.4	%0.4	%1.8	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%2.2	%0.3
		Hamilton	0	0	%2.2	%0.3
		Yu&Cho	%2.2	%2.2	0	%7.4
		Bruggeman	%0.3	%0.3	%7.4	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	%2.3	%0.3
		Hamilton	0	0	%2.3	%0.3
		Yu&Cho	%2.3	%2.3	0	%0.8
		Bruggeman	%0.3	%0.3	%0.8	0

**Tablo 9.** Hibrit nanoakışkanlar için literatür modellerinin hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış termal iletkenliklerinin sapma değerleri

Derişim	Akışkan	Model	Maxwell	Hamilton	Yu&Cho
%0.5	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%1.9	%1.7
		Hamilton	%1.9	0	%0.2
		Yu&Cho	%1.7	%0.2	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%4.6	%4.8
		Hamilton	%4.6	0	%0.2
		Yu&Cho	%4.8	%0.2	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%1.4	%1.9
		Hamilton	%1.4	0	%0.5
		Yu&Cho	%1.9	%0.5	0
%1.0	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%3.7	%3.4
		Hamilton	%3.7	0	%0.4
		Yu&Cho	%3.4	%0.4	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%5.4	%5.7
		Hamilton	%5.4	0	%0.3
		Yu&Cho	%5.7	%0.3	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%3.5	%3.8
		Hamilton	%3.5	0	%0.3
		Yu&Cho	%3.8	%0.3	0
%2.0	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%7.4	%6.5
		Hamilton	%7.4	0	%0.9
		Yu&Cho	%6.5	%0.9	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%7.1	%7.5
		Hamilton	%7.1	0	%0.4
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%7.1	%7.5
		Hamilton	%7.1	0	%0.4
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0
%2.5	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%9.1	%8
		Hamilton	%9.1	0	%1.2
		Yu&Cho	%8	%1.2	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%7.6	%8.9
		Hamilton	%7.6	0	%1.5
		Yu&Cho	%8.9	%1.5	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%8	%8.1
		Hamilton	%8	0	%0.1
		Yu&Cho	%8.1	%0.1	0

Hacimsel derişim arttığında oksit ve hibrit nanoakışkanlarda özgül ısı değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Örneğin CuO/su nanoakışkanını %0.5, %1, %2, %2.5 hacimsel derişimlerde Pak&Cho modelinde sırasıyla 4161,8 J/kgK, 4143,5 J/kgK, 4107 J/kgK, 4088,8 J/kgK özgül ısı değerlerini almıştır. Xuan & Roetzel modelinde ise sırasıyla 4067 J/kgK, 3959,9 J/kgK, 3761,2 J/kgK, 3668,8 J/kgK değerlerini almıştır. Xuan&Roetzel-Pak&Cho sapma değerleri ise sırasıyla %2.3, %4.4, %8.4, %10.3 olarak elde edilmiştir. (CuO+ZnO)/su hibrit nanoakışkanını ise %0.5, %1, %2, %2.5 hacimsel derişimlerde Xuan & Roetzel modelinde sırasıyla 4160,4 J/kgK, 4140,8 J/kgK, 4101,5 J/kgK, 4081,9 J/kgK özgül ısı değerlerini almıştır. Pak&Cho modelinde ise sırasıyla 4073,9 J/kgK, 3972,9 J/kgK, 3784,3 J/kgK, 3696,3 J/kgK özgül ısı değerlerini almıştır. Xuan&Roetzel-Pak&Cho sapma değerleri ise sırasıyla %2.1, %4.1, %7.7, %9.4 olarak elde edilmiştir.

Oksit nanoakışkanlar ile hibrit nanoakışkanların özgül ısıları karşılaştırıldığında hibrit nanoakışkanların özgül ısı değerlerinin oksit nanoakışkanlardan daha yüksek değerlere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 7’de verilen viskozite değeri hesabında kullanılan modeller incelendiğinde dinamik viskozitenin hacimsel derişim arttıkça arttığı görülmektedir. Yüksek viskozite artışı ısı sistemlerde istenmeyen bir etki yaratmaktadır. Hacimsel derişim arttıkça açık bir şekilde viskozitenin arttığı bilinmektedir dolayısıyla Einstein modelinde bu artış çok rahat gözlenebilmektedir. Maiga ve Buongiorno modelleri birbirine yakın değerler almıştır ve aradaki bu düşük sapma değeri ile daha çok tercih edilmektedir. Suresh vd., yaptıkları çalışmada hibrit nanoakışkanları için yüksek hacim konsantrasyonlarındaki verilen Einstein viskozite modelinin deneysel verilerle uyum sağlamadığını belirtmişlerdir [37].

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada CuO, ZnO, MgO parçacıkları ve CuO+ZnO, MgO+CuO, MgO+ZnO hibrit parçacıklarının nano boyutta olacak şekilde saf su içerisine belirli oranlarda katılarak elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özellikleri teorik olarak literatürdeki modeller kullanılarak belirlenmiştir. Baz sıvı içindeki farklı konsantrasyonlardaki (%0.5, %1, %2, %2.5) nanoakışkanların ısı iletkenlik, özgül ısı, viskozite değerleri hesaplanmış ve modeller karşılaştırılmıştır.

- Nanoakışkanların içerisinde bulunan metal oksitler sayesinde ısı tutma ve taşıma kapasitesinin saf suya göre daha fazla olduğu görülmüştür. Hacimsel derişimin oranının artmasıyla nanoakışkanlar içerisinde bulunan nano parçacıkların birbirleriyle oluşturduğu etkileşim nedeniyle akışa karşı oluşan direncin arttığı dolayısıyla her bir modelde viskozitenin yükseldiği görülmüştür. Einstein modelinde bu artış çok rahat gözlenebilmektedir. Maiga ve Buongiorno modelleri aralarındaki düşük sapma değeri ile araştırmacılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Önceki çalışmalarda hibrit nanoakışkan için viskozite değerlerinin farklı baz akışkan oranlarında arttığı, artan sıcaklıkla ise azaldığı gözlemlenmiş olup bu durumun askıda kalan nanoparçacıkların oluşturduğu dirençten kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda pompalama gücünden tasarruf sağlanması için viskozite değerinin optimal düzeyi belirlenmelidir [35].

- Oksit ve hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliğinin bütün karışım oranlarında baz akışkanın ısı iletkenliğinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre kullanılan bütün modellerde nanoakışkanların hacimsel derişimi arttığında özgül ısı değerleri azalmaktadır. Oksit nanoakışkanlarda modeller arasındaki farkın değerlendirildiği sapma değerlerine bakıldığında en düşük sapma değerine sahip olan Maxwell ve Hamilton modelleri, hibrit nanoakışkanlarda ise Yu&Cho ve Hamilton modelleri literatürde de en çok tercih edilen modeller olmaktadır.

- Termofiziksel özellikleri saf suya kıyasla daha üstün olan nanoakışkanların ısı borusu, ısı değiştiriciler gibi ısı sistemlerde kullanılması ile söz konusu sistemlerin veriminin çok daha yüksek olacağı gözlemlenmiştir.

- Sonraki çalışmalarda farklı konsantrasyonlarda farklı nano akışkanlar kullanılarak belirlenen termofiziksel özelliklerin performansa etkisi incelenebilir, deneysel çalışmalarla literatür modellerinin kıyaslanması üzerinde araştırmalar yapılabilir. Daha farklı nanoparçacık hacimsel oranları ve farklı sıcaklık değerlerinin termofiziksel özelliklere etkisi için ölçümler yapılabilir. Deneysel çalışma kontrollü olarak yapılmalı, akışkanın kararlılığı, kümeleşme, çökme gibi verimi etkileyen unsurlara dikkat edilmelidir. Su yerine farklı baz akışkanlar kullanılarak belirlenen termofiziksel özelliklerle performans değerlendirmesi yapılabilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Araştırma süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adnan SÖZEN’ e teşekkürlerimi sunarım.

**SİMGELER VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)**

CuO: Bakır oksit nanoparçacık	$\mu$ : Dinamik viskozite[kg/ms]
ZnO: Çinko oksit nanoparçacık	$k_e$ : Nanoakışkanın efektif ısı iletkenlik değeri [W/mK]
MgO: Magnezyum oksit nanoparçacık	$k_b, k_t$ : Baz akışkanın ısı iletkenlik değeri [W/mK]
$c_p$ : Özgül ısı [kJ/kgK]	$k_{np}$ : Nanoparçacık ısı iletkenlik değeri [W/mK]
$\mu$ : Viskozite [kg/ms]	$c_{p,bf}$ : Baz akışkanın özgül ısı [kJ/kgK]
$\varphi_{np}$ : Nanoparçacık hacimsel oranı [%]	
$c_{phn}$ : Nanoakışkan özgül ısı değeri [kJ/kgK]	
$\rho_{hn}$ : Nanoakışkanın yoğunluk değeri [kg/m <sup>3</sup> ]	

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Wang, X., Xu, X. and Choi, S. U. S. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13(4), 474-480.
- [2] Han, D., He, W. and Asif, F. Z. (2017). Experimental study of heat transfer enhancement using nanofluid in double tube heat exchanger, Energy Procedia, 142, 2547-2553.
- [3] Ardekani, A. M., Kalantar, V. and Heyhat, M. M. (2019). Experimental study on heat transfer enhancement of nanofluid flow through helical tubes, Advanced Powder Technology, 30(9), 1815-1822.
- [4] Teng, T. P., Hsu, H. G., Mo, H. E. and Chen, C. C. (2010). Thermal efficiency of heat pipe with alumina nanofluid, Journal of Alloys and Compounds, 504(1), 380-384.
- [5] Anitha, S., Thomas, T., Parthiban, V. and Pichumani, M. (2019). What dominates heat transfer performance of hybrid nanofluid in single pass Shell and tube heat exchanger?, Advanced Powder Technology, 30(12), 3107-3117.
- [6] Sundar L. S., Singh M. K., Ferro M. C., and Sousaa A. C. M. (2017). Experimental investigation of the thermal transport properties of grapheneoxide/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hybrid nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, 84, 1-10.
- [7] Murshed, S.M.S., Santos, F.J.V., Nieto de Castro, C.A. (2018). Morphology and thermophysical properties of non-aqueous titania nanofluids, Heat Mass Transfer 54, 2645–2650.
- [8] Turgut A., Tavman I., Chirtoc M., Schuchmann H.P., Sauter C. and Tavman S. (2009). Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluids, International Journal of Thermophysics, 30(4), 1213-1226.
- [9] Ghasemi S. and Karimipour A. (2018). Experimental investigation of the effects of temperature and mass fraction on the dynamic viscosity of CuO-paraffin nanofluid, Applied Thermal Engineering, 128, 189-197.
- [10] Tiwari, A. K., Ghosh, P. and Sarkar, J. (2013). Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids, Experimental Thermal and Fluid Science, 49, 141-151.
- [11] Onyiriuka, E., Ighodaro, O., Adelaja, A., Ewim, D. and Bhattacharyya, S. (2019). A numerical investigation of the heat transfer characteristics of water-based mango bark nanofluid flowing in a double-pipe heat exchanger, Heliyon, 5(9), e02416.

- [12] Wang B.X., Zhou L.P. and Peng X.F. (2006). Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles, *International Journal of Thermophysics*, 27(1), 139-151.
- [13] Sundar, L. S., Sharma, K.V., Singh, M. K., Sousa, A. C. M. (2017). Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 185-198.
- [14] Nguyen, C., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Mare, T. and Boucher, S. (2008). Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?, *International Journal of Thermal Science*, 47, 103–111.
- [15] Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Legido, J. L. and Pineiro, M. M. (2011). CuO in water nanofluid: Influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity, *Fluid Phase Equilibria*, 300, 188-196.
- [16] Suganthi K. S. and Rajan K. S. (2012). Temperature induced changes in ZnO – water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25-26), 796-798.
- [17] Sahooli, M. and Sabbaghi, S. (2013). Investigation of thermal properties of CuO nanoparticles on the ethylene glycol–water mixture, *Materials Letters*, 93, 254-257.
- [18] Nadooshan, A. A. (2017). An experimental correlation approach for predicting thermal conductivity of water-EG based nanofluids of zinc oxide, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 87, 15-19.
- [19] Kim, H. D., Kim, J. and Kim, M. H. (2007). Experimental studies on CHF characteristics of nanofluids at pool boiling, *International Journal of Multiphase Flow*, 33(7), 691-706.
- [20] Esfe M. H., Afrand M., Karimipour A., Wei-MonYan, Nima, Sina. (2015). An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 173-175.
- [21] Esfe M. H., Saedodin S., Mahmoodi M. (2014). Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, 68-78.
- [22] Kumar, P. M., Kumar, J., Tamilarasan, R., Sendhilnathan, S. and Suresh, S. (2015). Review on nanofluids theoretical thermal conductivity models, *Engineering Journal*, 19(1), 67–83.
- [23] Bellos, E. and Tzivanidis, C. (2017). Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2, 71–79.
- [24] Gupta, M., Singh, V., Kumar, R. and Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638–670.
- [25] Humnic, G. and Humnic, A. (2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications—A state-of the art review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 82–103.
- [26] Senthilkumar, A. P. (2012). Effectiveness study on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Nanofluid Heat Exchanger, *International Journal of Engineering and Robot Technology*, 3(2), 8613.
- [27] Sözen, A., Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Gürü, M. and Aytac, İ. (2016). Heat transfer enhancement using alumina and fly ash nanofluids in parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers, *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 414-424.

- [28] Ateş H., Bahçeci E. (2015). Nano malzemeler için üretim yöntemleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji, 3(2):483-499.
- [29] Akilu, S., Baheta, A. T. and Sharma, K.V. (2017). Experimental measurements of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol-based hybrid nanofluid with TiO<sub>2</sub>-CuO/C inclusions, Journal of Molecular Liquids, 246, 396-405.
- [30] Mousavi, S. M., Esmailzadeh F. and Wang, X. P. (2019). A detailed investigation on the thermo-physical and rheological behavior of MgO/TiO<sub>2</sub> aqueous dual hybrid nanofluid, Journal of Molecular Liquids, 282, 323-339.
- [31] Chandrasekar, M., Suresh, S., Chandra B. A. (2010). Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 210-216.
- [32] Maxwell, J. C. (1881). A treatise on electricity and magnetism second ed., Clarendon Press, Oxford, UK.
- [33] Avsec, J., Oblak, M. (2007). The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nanomechanics, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 4331-4341.
- [34] Öcal, S. (2019). Isı transferi uygulamaları için çeşitli hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin incelenmesi, T.C. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [35] Karakaş A. (2019). Çok bileşenli nanoakışkanların üretilmesi ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi, T.C. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [36] Takabi, B., Salehi, S. (2014). Augmentation of the heat transfer performance of a sinusoidal corrugated enclosure by employing hybrid nanofluid, Advances in Mechanical Engineering, 2014,16.
- [37] Suresh, S., Venkataraj, K. P., Selvakumar P. and Chandrasekar M. (2011). Synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 388, 1-3, 41-48.



## Classification of Lung Sounds with Deep Learning

 Mehmet Bilal ER 

Harran University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 63300, Haliliye/Şanlıurfa

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 26/06/2020  
 Revision: 05/10/2020  
 Accepted: 05/10/2020

#### Highlights

- Lung sound.
- Data augment
- Deep learning

#### Keywords

Lung sounds classification  
 Convolutional neural  
 network  
 Deep learning

In this study, a method based on deep learning has been proposed for the classification of lung sounds. For this purpose, the Convolutional Neural Network (CNN) has been designed. In addition, experiments are carried out using different machine learning methods based on feature extraction.

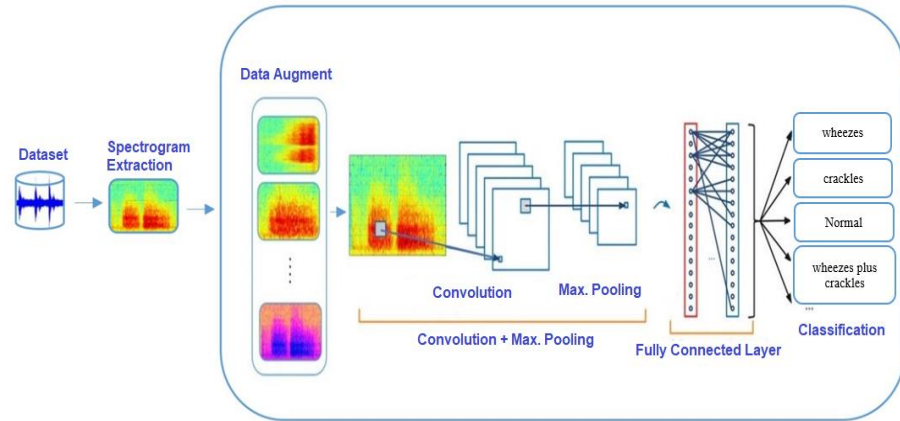


Figure A. Schema of the Proposed Method

**Purpose:** The focuses is on automatic diagnosis of lung diseases, one of the most important issues in public health. There have been many studies on this subject in the literature, but most of these studies consist of traditional methods. The aim of this study is to increase the classification performance of lung sounds with deep learning.

**Theory and Methods:** The proposed method for the classification of lung sounds consists of five steps. First, lung sound signals are pre-processed, and spectrograms are obtained. After applying the data augment process to spectrograms, spectrogram images are given as input to the designed ESA model and the classification process is made.

**Results:** Experiments to evaluate the effectiveness of different methods are carried out using the ICBHI 2017 data set consisting of four classes commonly used in the literature. On average, 64.5% accuracy was obtained from the proposed method. The simulation and experimental results are presented and compared in Section 6.

**Conclusion:** In this study, deep learning is discussed to improve the classification performance of lung sounds. By designing a 12-layer CNN, spectrogram images are given to the first layer, and the classification process is made. Before the data augment, an average of 60.14% classification performance is obtained. After the data augmentation, an average classification performance of 64.50% is obtained. In addition, in order to compare the performance of the proposed method with other machine learning methods, MFCC features are extracted from the data set samples and the classification process is made with SVM and K-NN.

GU J Sci, Part C, 8(4): 830-844 (2020)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Akciğer Seslerinin Derin Öğrenme ile Sınıflandırılması

Mehmet Bilal ER

*Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 63300, Haliliye/Şanlıurfa*

### Öz

Akciğer hastalıkları, insan sağlığını ciddi olarak tehdit eden hastalıklar arasındadır ve günümüzde birçok ölüm akciğer hastalıklarından kaynaklanmaktadır. Akciğer sesleri sayesinde akciğer hastalıkları ile ilgili önemli çıkarımlar yapılabilmektedir. Akciğer rahatsızlığı olan hastaları değerlendirmek için doktorlar genellikle oskültasyon tekniğini kullanırlar. Ancak, bu tekniğin bazı dezavantajları vardır. Örneğin, doktor iyi bir tıp eğitimi almamışsa, bu yanlış tanıya neden olabilir. Ayrıca akciğer sesleri durağan olmadığından dolayı analiz, tanıma süreci karmaşıktır. Bu nedenle otomatik tanıma sistemlerinin geliştirilmesi daha kesin ve doğru tanıları koymada yardımcı olacaktır. Akciğer hastalıklarını teşhis etmek ve uzmanlara teşhislerinde yardımcı olmak için geleneksel ses işleme rutinlerine dayanan birçok çalışma önerilmiştir. Bu çalışmada akciğer seslerinin sınıflandırılması için derin öğrenmeye dayanan bir yöntem önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) tasarlanmıştır. Ayrıca özellik çıkarımına dayanan farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak da deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, farklı yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek için literatürde yaygın olarak kullanılan, dört sınıftan oluşan ICBHI 2017 veri seti ile yapılmıştır. Ortalama olarak %64,5 doğruluk önerilen yöntemden elde edilmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 26/06/2020  
Düzeltilme: 05/10/2020  
Kabul: 05/10/2020

### Anahtar Kelimeler

*Akciğer seslerinin sınıflandırılması*  
*Evrişimsel Sinir Ağı*  
*Derin Öğrenme*

### Keywords

*Lung sounds classification*  
*Convolutional neural network*  
*Deep learning*

## Classification of Lung Sounds with Deep Learning

### Abstract

Lung diseases are among the diseases that seriously threaten human health, and many deaths today are caused by lung diseases. Thanks to the lung sounds, important inferences can be made about lung diseases. Doctors often use the auscultation technique to evaluate patients with lung conditions. However, this technique has some drawbacks. For example, this may lead to a misdiagnosis if the doctor has not received a good medical education. In addition, since the lung sounds are nonstationary, the analysis and recognition process is complex. Therefore, the development of automatic recognition systems will help in making more precise and accurate diagnoses. Many studies based on traditional sound processing routines have been proposed to diagnose lung diseases and to assist professionals in their diagnosis. In this study, a method based on deep learning has been proposed for the classification of lung sounds. For this purpose, the Convolutional Neural Network (CNN) has been designed. In addition, experiments are carried out using different machine learning methods based on feature extraction. Experiments to evaluate the effectiveness of different methods are carried out using the ICBHI 2017 data set consisting of four classes commonly used in the literature. On average, 64.5% accuracy is obtained from the proposed method. In addition, when the results obtained from the proposed method are compared with the latest methods in the literature, it is seen that it has a better performance in terms of classification success.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern tıpta teşhis, daha çok görsel veya işitsel bilgilerle ilişkilidir. Tıbbi bilgiler farklı yöntemlerden edinilebilir ve temel olarak bu veriler tıp uzmanına görüntü veya ses olarak gösterilir. İspirasyon ve ekspirasyon sırasında hava akımı nedeniyle akciğerler tarafından üretilen ses sinyalleri, solunum sisteminin durumu hakkında güçlü bir bilgi kaynağı oluşturur. Oskültasyon, doktorların bir stetoskop kullanarak pulmoner rahatsızlığı olan hastaları değerlendirip teşhis ettikleri bir tekniktir [1]. Bu teknik herhangi bir risk veya yan etki oluşturmaz. Bu yöntemden etkin ve doğru sonuçlar alınması, doktorun insan vücudu

tarafından üretilen normal ve anormal sesleri tanıma yeteneğine bağlıdır. Ayrıca, akciğer sesleri durağan olmayan sinyallerdir ve buna bağlı olarak oskültasyon yöntemi sırasında seslerin analiz edilmesi zorlaşacaktır. Bu nedenle, oskültasyon yönteminin bir örüntü tanıma sistemi ile birlikte kullanımı, daha kesin ve doğru klinik tanımlar koymada yardımcı olacaktır [2], [3]. Akciğer sesleri iki kategoriye ayrılabilir: normal (vesicular) solunum sesleri ve normal olmayan (adventitious) solunum sesleri. Solunum bozuklukları olmadığında normal solunum sesleri duyulur ve solunum bozukluğu olduğunda ise ek sesler duyulur [4]. Normal solunum sesleri dinlenirken trakeal, bronşiyal ve bronkoveziküler sesler dikkate alınmalıdır. Bu sesler için inspirasyon süresi ekspirasyon süresinden daha fazladır. Normal akciğer sesi 100-1000 Hz frekans aralığında uzanır ve ses sinyalinde farklı tepe noktaları yoktur [5], [6]. Normal olmayan solunum seslerinde normal nefes seslerine eklenen ek bir solunum sesi vardır. Bunlar sürekli ve ayrık olmak üzere iki gruba ayrılırlar [7]. Sürekli sesler üfürüm (wheeze) gibiyken, ayrık sesler ise çıtırtı (crackle) şeklindedir. Bu tür seslerin varlığı genellikle akciğer bozukluğunu gösterir. Müzikal bir karakteristik yapıya sahip olan sürekli gruptaki üfürüm sesleri genellikle 100 Hz'nin üzerinde baskın frekansa sahiptir. Ayrıca 100 ms'den büyük periyodik dalga formları oluşturan ses sinyalidir. Örnek olarak Rhonchi sürekli sesler grubundadır ve yaklaşık 200 Hz veya daha düşük bir baskın frekans tarafından karakterize edilir [6]. Ayrıca üfürüm sesleri, obstrüktif akciğer hastalığının yaygın bir belirtisidir ve bu hastalıklar astım, zatürre ve bronşit olabilir. Çıtırtı sesleri ise ayrık akciğer sesleridir ve kardiyovasküler hastalıklarda sıklıkla görülür. Süreleri 20 ms'den azdır ve frekans içerikleri tipik olarak geniştir [8].

Literatürde birçok akciğer sesi kategorisi vardır. Bu çalışmada ICBHI 2017 veri setindeki sınıflar incelenmiştir. Geleneksel akciğer sesi sınıflandırma çalışmalarında genellikle akciğer sesi sinyallerinden farklı özellikler çıkarılmaktadır. Çıkarılan özellikler ile sınıf etiketleri arasındaki ilişkiyi öğrenmek için farklı makine öğrenmesi algoritmaları uygulanmaktadır. Bu çalışmada akciğer sesi sınıflandırmasında derin öğrenmeye dayalı bir yöntem kullanılmaktadır. İlk olarak ses sinyalleri ön işlemden geçirilmiştir. Daha sonra akciğer sesi sinyallerinden karışık özellikler çıkarmak yerine, bu sinyalleri görsel olarak ifade eden spektrogramlar çıkarılmıştır. Spektrogramlar tasarlanan ESA'ya girdi olarak verilerek özellik çıkarma ve sınıflandırma işlemi yapılmıştır.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de literatürdeki akciğer seslerinin sınıflandırılması ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiştir ve aralarındaki farklar ortaya konulmuştur. Bölüm 3, 4 ve 5'te materyal ve önerilen yöntem tanımlanmıştır. Bölüm 6'da veri seti ve araştırmada kullanılan akciğer seslerinin sınıflandırılmasıyla ilgili deneysel uygulamalar verilmiştir. Bölüm 7'de ise araştırmanın bulguları tartışılmıştır.

## 2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Akciğer seslerinin analizini ve sentezini içeren bazı dikkate değer çalışmalar bu bölümde verilecektir. Örüntü tanıma ve yapay zekanın gelişmesiyle, farklı akciğer seslerinin sınıflandırılması için otomatik sistemler geliştirmek için birçok özelliğe dayalı yaklaşım önerilmiştir.

İçer ve Gengeç (2014), normal ve anormal akciğer seslerini sınıflandırmak için güç spektral yoğunluk değerlerinin frekans oranını ve Hilbert-Huang Dönüşümü (HHD) özelliklerini kullandılar. Sınıflandırıcı olarak Destek Vektör Makineleri (DVM) kullanılmıştır ve %90'ın üzerinde doğruluk elde edilmiştir [2].

Naves ve ark. (2016), akciğer seslerinin sınıflandırılması için K-NN ve Bayes sınıflandırıcıları tercih etmişlerdir. Kullanılan veri setinde beş tip akciğer sesi bulunmaktadır. Genetik algoritmalar ve Fisher doğrusal ayırıcı özellik azaltmak için kullanılmıştır. Sınıflandırıcı doğruluğu ortalama olarak %98,1' dir [3]. Serbes ve ark. (2013), zaman frekansı ve zaman ölçeği (TS) analizini önermektedir. Özellik çıkarma adımı, zaman frekansı ve zaman ölçeği analizi kullanılmıştır. Ön işleme için, çıtırtı bilgisi içermeyen frekans bantlarını çıkarmak amacıyla Çift ağaçlı karmaşık dalgacık dönüşümü (Dual-tree complex wavelet transform - DTCWT) uygulanmıştır. Sınıflandırma adımı, çıtırtı ve çıtırtı olmayan sesleri sınıflandırmak için K-En Yakın Komşular (K-NN), DVM ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmıştır. En iyi sınıflandırma sonucu %97,5 olarak DVM'den elde edilmiştir [9].

Jin ve Sattar (2014), solunum seslerini sınıflandırmak için DVM kullanmışlardır. Sinyallerden anlamlılık (kurtosis), ayırma fonksiyonu (diskriminant fonksiyon) ve entropi gibi özellikler çıkarılarak optimal olarak %97,7 ile %98,8 arasında sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir [10].

Bahoura (2009), iki sınıftan oluşan akciğer solunum seslerinin sınıflandırılması için farklı bir yaklaşım önermiştir. Sinyallerden Mel-frekanslı cepstral katsayıları (MFCC) çıkarılmıştır ve özellik kümesi olarak

kullanılmıştır. Sınıflandırmak için ise Gauss Karışım Modeli kullanılmıştır ve %94,2 sınıflandırma başarımı elde edilmiştir [11].

Orjuela ve ark. (2014), normal, üfürüm ve çıtırtı solunum seslerini sınıflandırmak için YSA ile birlikte MFCC özelliklerini kullanmışlardır. Sınıflandırma başarımı çıtırtı solunum seslerinde %75, üfürüm solunumlarda %100 ve normal solunum seslerinde ise %80 olarak hesaplanmıştır [12].

Maruf ve ark. (2015), Gauss Karışım Modeli'ni kullanarak çıtırtı solunum seslerinin normal solunum seslerinden ayrılması ve sınıflandırılması için bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışma dört adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar önileme, özellik çıkarma, özellik seçme ve sınıflandırma şeklindedir. Ön işleme adımında, arka plan gürültüsü azaltımı için bir bant geçiren filtre kullanılmıştır ve daha sonra enerji ve spektrogram gibi özellikler çıkarılmıştır. Özellik seçme adımından sonra, nihai özellikler Gauss Karışım Modeli kullanılarak eğitilmiştir. Çalışmadan elde edilen genel doğruluk %97,56'dır [13].

Yeginer ve Kahya (2007), veziküler sesin çıtırtılı solunum ses sinyalinin atılması için otomatik bir yöntem önermişlerdir. İlgilenilen bir bölgeyi seçtikten sonra, o bölgedeki ham ve filtrelenmiş dalga formları arasındaki korelasyona dayalı bozulma metriği tanımlanmıştır. Filtre kesme frekansı bozulma metriğine göre tahmin edilmiştir. Hesaplama maliyetini azaltmak için, tahmini kesme frekansından yeni bir kesme frekansı öngören bir regresyon analizi de gerçekleştirilmiştir [14].

Serbes ve ark. (2017), çeşitli akciğer seslerini sınıflandırmak için radyal temelli fonksiyon çekirdeğe sahip DVM kullanmışlardır. Veri seti olarak 126 kişiden elde edilen 920 kayıttan oluşan ICBHI 2017 kullanılmıştır. Seslerin ayırt edici özelliklerini temsil eden spektral özellikler çıkarılarak dört sınıftan oluşan veri seti sınıflandırılmaya çalışılmıştır. %57,88 doğruluk elde edilmiştir [15].

Chambres ve ark. (2018), güçlendirilmiş bir karar ağacı modeli ve daha fazla ses özelliğine sahip bir makine öğrenimi yaklaşımı önermişlerdir. Veri seti olarak ICBHI 2017 kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre %49,63 sınıflandırma başarımına ulaşılmıştır [16]. ESA'lar, geniş ölçekli nesne sınıflandırması için oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Bardou ve ark. (2018), akciğer seslerinin sınıflandırılması için üç makine öğrenme yaklaşımını karşılaştırmışlardır. İlk iki yaklaşım, manuel özellik (handcrafted features) çıkarımı ve DVM, K-NN ve Gauss Karışım Modelinin eğitimine dayanmaktadır. Üçüncü yaklaşım, ESA tasarımına dayanmaktadır. İlk yaklaşımda, ses dosyalarından 12 MFCC çıkarılmıştır. İkinci yaklaşımda ses dosyalarını görsel olarak temsil eden spektrogramlar çıkarılmıştır. ESA'nın nihai doğruluğunu arttırmak için spektrogramlara veri seti büyütme teknikleri uygulanmıştır. Sonuçlar, ESA'nın manuel çıkarılan özelliklere dayalı sınıflandırıcılardan daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir [17].

Jácome ve ark. (2019), akciğer ses kayıtlarından solunum fazı tespiti için derin öğrenmeye dayalı bir algoritma oluşturmuşlardır. Algoritma da evrişimli bir sinir ağı kullanılmıştır ve özellik olarak ise spektrogramlar tercih edilmiştir. Literatürde var olan ve üç alt kümesi bulunan veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir ve ortalama olarak %84 başarımla elde edilmiştir. [18].

Demir ve ark. (2019), akciğer ses sinyalleri başlangıçta zaman-frekans yöntemi kullanılarak spektrogram görüntülerine dönüştürmüştür. Sınıflandırma için iki derin öğrenme tabanlı yaklaşım kullanılmıştır. İlk yaklaşımda, özelliklerin çıkarılması için önceden eğitilmiş bir derin ESA modeli ve akciğer seslerinin sınıflandırılması için ise DVM sınıflandırıcısı kullanılmıştır. İkinci yaklaşımda, önceden eğitilmiş ESA modeli kullanılarak transfer öğrenme işlemi uygulanmıştır. Önerilen yöntemlerin doğrulukları on kat çapraz doğrulama kullanılarak test edilmiştir. Önerilen birinci ve ikinci yöntemlerden elde edilen doğruluklar sırasıyla %65,5 ve %63,09'dur [1].

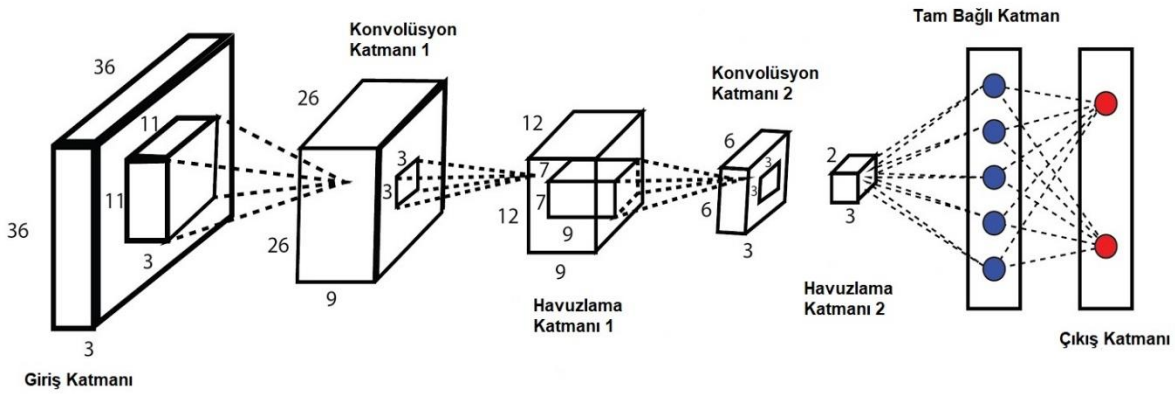
Kochetov ve ark (2018), solunum seslerinin sınıflandırılması için gürültü maskeleyme tekniği ve tekrarlayan sinir ağı kullanarak yeni bir model önermişlerdir. Önerilen model, solunum benzeri sesleri gürültü olmadan çıkarmaya dayanmaktadır. Çıkarılan özellikler dört sınıftan oluşan veri seti örneklerini sınıflandırmak için kullanılmıştır. Önerilen model, açık erişimli veri seti üzerinde test edilmiştir ve %65,7 başarımla elde edilmiştir [19].

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıdaki gibidir:

- Sınıflandırma başarımını arttırmak için veri artırma işlemi uygulanarak veriler eğitilmiştir.
- Çoğu akciğer sesi sınıflandırma çalışmalarında ya derin öğrenme ya da makine öğrenimi tek başına kullanılmıştır. Bu çalışmadaki deneylerde derin öğrenme ve makine öğreniminin sınıflandırma sonuçları birlikte verilmiştir.

### 3. EVRİŞİMSEL SİNİR AĞLARI (CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK)

ESA, yapay sinir ağlarının özel bir mimarisidir. Ana görevi, derin öğrenme teknolojisinde görüntülerin etkili bir şekilde tanınmasıdır. ESA mimarisi, insan beynindeki nöronların bağlantı modeline benzer ve görsel korteksin yapısından esinlenilerek tasarlanmıştır [20]. Diğer görüntü sınıflandırma algoritmalarına kıyasla, bu mimariler minimum ön işleme kullanır. ESA'lar, bilgisayarlı görme alanında en etkili yeniliklerden biri olmuşlardır ve geleneksel yaklaşımlardan çok daha iyi performans göstermişlerdir [21]. Görüntü sınıflandırma, nesne algılama, segmentasyon, yüz tanıma gibi birçok çalışmada başarılı sonuçlar vermişlerdir. Bununla birlikte, ESA'lar görüntü tanıma ile sınırlı değildir. Bu mimariler ses işleme, metin işleme gibi çalışmalarda da etkin sonuç vermektedir. Şekil 1'de ESA genel mimarisi yer almaktadır. Teknik olarak genel bir ESA modelinde konvolüsyon, havuzlama, tam bağlı katmanlar ve sınıflandırma katmanı bulunur [22].



Şekil 1. Evrişimsel Sinir Ağı

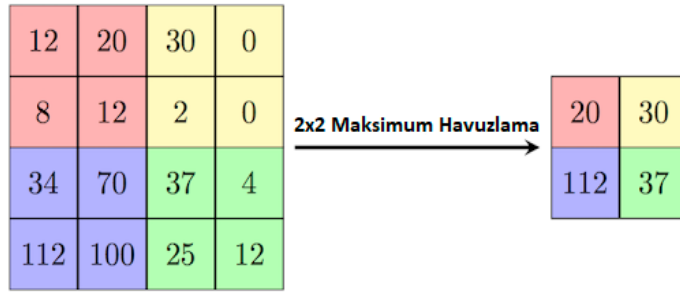
Konvolüsyon, bir giriş görüntüsünden özellikleri ayıklayan ilk katmandır. Evrişim, giriş görüntüsünden özellik haritası çıkarmak için giriş görüntüsüne uygulanan filtredir. Görüntü matrisi ve filtre gibi iki giriş alan bir matematik işlemidir. Kenar algılama, bulanıklaştırma ve keskinleştirme gibi filtreler uygulayarak konvolüsyonu işlemi gerçekleştirilir. Filtrelerin yüksekliği ve ağırlığı giriş hacminden daha küçüktür. Konvolüsyon işlemi için gerekli formül denklem (1)'de verilmiştir. Giriş görüntüsü  $f$  ile, çekirdeğimiz  $h$  ile gösterilir. Sonuç matrisinin satır ve sütun indeksleri sırasıyla  $m$  ve  $n$  ile gösterilir.

$$G[m, n] = (f * h)[m, n] = \sum_j \sum_k h[j, k] f[m - j, n - k] \quad 1$$

Her konvolüsyondan sonra aktivasyon fonksiyonu kullanılır. Derin ağlarda aktivasyon fonksiyonu olarak genellikle Düzleştirilmiş Doğrusal Birim (ReLU) kullanılır. ReLU'nun amacı modelin doğrusal olmayan bir yapıya gelmesini sağlamaktır. ReLU fonksiyonu denklem (2)'de verilmiştir.

$$ReLU(x) = \max(x, 0) \quad 2$$

Denklem 2'ye göre ReLU çıkışı, sıfır ile giriş değeri arasındaki maksimum değerdir. Giriş değeri negatif olduğunda çıkış değeri sıfıra, giriş pozitif olduğunda çıkış değeri giriş değerine eşittir. ESA'larda ayrıca havuzlama (pooling) katmanı bulunur. Havuzlama katmanı, evrişimden sonra girdi görüntüsünün uzaysal hacmini azaltmak için ve hesaplamaları hızlandırmak için kullanılırlar. Şekil 2'de maksimum havuzlama (max pooling) örneği verilmektedir. Örnekte  $4 \times 4$  boyut girişinin  $2 \times 2$  boyuta azaldığı görülmektedir.



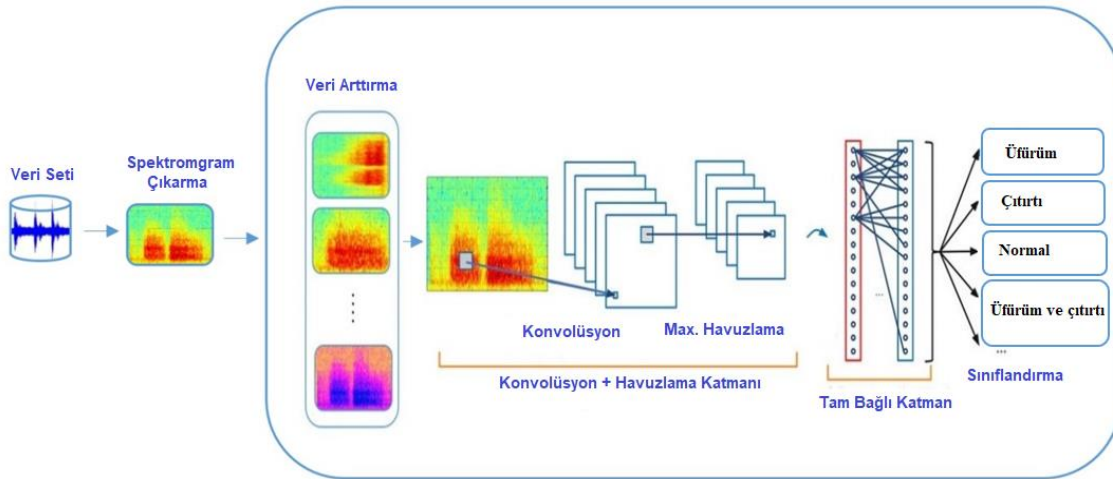
Şekil2. Maksimum Havuzlama

Tamamen bağlı katmanlar, görüntüleri tanıma ve sınıflandırmada çok başarılı olduğu kanıtlanmış derin ağların önemli bir bileşenidir. ESA süreci, evrişim ve havuzlama, görüntüyü unsurlara ayırma ve bağımsız olarak analiz etme ile başlar. Bu sürecin sonucu, nihai sınıflandırma kararı yönlendiren tamamen bağlantılı bir sinir ağı yapısına bağlanır. Tamamen bağlı giriş katmanı, önceki katmanların çıktısını alıp düzleştirir ve sonraki aşama için girdi olabilecek tek bir vektöre dönüştürür. Tamamen bağlı giriş katmanından sonra özellik girdileri alınır ve doğru etiketi tahmin etmek için ağırlıklar güncellenir. Son katman ise çıkış katmanıdır ve her etiket için olasılıklar tahmin edilir. Bu katmanda genellikle Softmax tercih edilir. Softmax formülü denklem (3)'de verilmiştir.

$$\text{Softmax}(x)_j = \frac{e^{x_j}}{\sum_{n=1}^N e^{x_n}}, j = 1 \dots N \quad 3$$

#### 4. ÖNERİLEN YÖNTEM (THE PROPOSED METHOD)

Akciğer seslerinin sınıflandırılması için önerilen yöntem beş adımdan oluşmaktadır. İlk olarak akciğer sesi sinyalleri ön işlemden geçirilerek spektrogramlar çıkarılmıştır. Spektrogramlara veri artırma (data augment) işlemi uygulandıktan sonra spektrogram görüntüleri tasarlanan ESA modeline girdi olarak verilerek sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Her adımın detayı aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır. Önerilen yöntem Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen Yöntem

##### 4.1. Sinyal Ön İşleme ve Spektrogram Çıkarma (Signal Pre-Processing and Spectrogram Extraction)

Akciğer ses sinyalleri ilk olarak 150-250 Hz frekans aralığında bant geçiren filtre uygulanarak ön işleme tabi tutulmuştur. Filtreden geçirilen akciğer sinyallerinden spektrogram çıkarabilmek için sinyal 20 ms

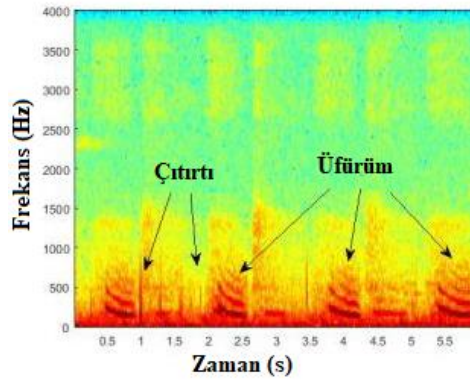
uzunluklarda çerçevelere ayrılmıştır. Birbirini takip eden çerçevelerin örtüşme oranı %50 olarak ayarlanmıştır. Bir sinyale çerçeveleme uygulandıktan sonra pencereleme (window) işlemi uygulanır. Bu araştırmada “Hamming penceresi” tercih edilmiştir. Hamming pencereleme formülü denklem (4)’de verilmiştir.

$$k[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right), \quad N: \text{Pencere uzunluğu} \quad 4$$

$$n: 0, 1, 2 \dots \dots N - 1$$

Hamming penceresinden sonra sinyale Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Bu araştırmada Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılmıştır. FFT dönüşümü denklem (5)’te verilmiştir. Son aşamada ise Fourier dönüşümü uygulanan sinyallerin güç spektrumları çıkarılmıştır. Örnek bir akciğer ses sinyali spektrum görüntüsü Şekil 4’te verilmiştir.

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-2\pi jkn / N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad 5$$



Şekil 4. Akciğer Ses Sinyali Spektrumunun Gösterimi

#### 4.2. Veri Arttırma (Data Augmentation)

Veri arttırma, orijinal verileri değiştirerek yeni veri noktaları oluşturma işlemi içerir. Bu süreçte, yeni veri toplamaya gerek kalmadan derin öğrenme alanındaki eğitim modelleri için mevcut verilerin çeşitliliği artırılır [23]. Ayrıca genel olarak, derin öğrenme modellerinin performansını arttırmada etkin bir işlemdir. Veri arttırma işlemi görüntüye veya sese uygulanabilir. Sese uygulanan veri arttırma işlemleri arka plana gürültü eklenmesi, sinyalin kaydırılması ve sinyalin uzatılması şeklinde olabilir. Görüntüye uygulanan veri arttırma işlemleri döndürme, yeniden boyutlandırma, kırpmaya ve farklı şekillerde olabilir [24]. Bu araştırmada veri arttırma işlemi orijinal veriler olan ses sinyalleri yerine, ses sinyallerinden elde edilen spektrum görüntülerine uygulanmıştır. Sese uygulanan tekniklerin kullanılmamasının sebebi veri setindeki ses sinyallerinin süresinin kısa olmasıdır. Ayrıca sesin arka planına gürültü eklenmesi gibi işlemler normal akciğer sesleri ile çıtırtılı ve üfürümlü akciğer seslerinin birbirine karışmasına neden olacaktır. Bu sebeplerden dolayı görüntüye uygulanan 5 farklı veri arttırma tekniği bu çalışmada kullanılmıştır. Bunlar, rastgele döndürme, kesme (shearing), renk kaydırma (color shifting), Gauss filtresi ve Tuz ve Biber Gürültüsü (Salt and Pepper Noise) şeklindedir. Bu işlem sonucunda bir dizi deformasyona uğratılmış ek eğitim verileri oluşturulmuştur. Fakat orijinal spektrum görüntüleri veri setinde korunmuştur.

#### 4.3. ESA Tasarımı (Design of CNN)

Tasarlanan ESA'nın topolojisi, 1 giriş katmanı, 4 konvolüsyon katmanı, 4 havuzlama katmanı, iki tam bağlantılı katmanı ve 1 çıkış katmanından oluşur. Tasarlanan mimaride toplam 12 katman bulunmaktadır. Birinci konvolüsyon katmanında  $7 \times 7$  boyutunda 64 adet konvolüsyon filtresi, ikinci konvolüsyon katmanında  $5 \times 5$  boyutunda 128 adet konvolüsyon filtresi, üçüncü konvolüsyon katmanında  $3 \times 3$  boyutunda 256 adet konvolüsyon filtresi, dördüncü konvolüsyon katmanında ise  $3 \times 3$  boyutunda 384 adet konvolüsyon

filtresi bulunmaktadır. Farklı sayılarda ve boyutlarda konvolüsyon katmanı kullanımının amacı spektrogramlardan etkin derin özellik çıkarımını sağlamak ve hesaplama maliyetini azaltmaktır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Tüm konvolüsyon katmanlarından sonra ReLU katmanı (aktivasyon katmanı) uygulanmıştır. Amaç, doğrusal olmayışı önerilen sisteme uyarlamaktır. Ayrıca her konvolüsyon ve ReLU işleminden sonra [2 2] boyutunda kaydırma adımıyla 3×3 maksimum havuzlama yapılmıştır. Tasarlanan mimari Tablo 1’de verilmiştir. Öğrenme oranı, epok sayısı ve mini-batch size ESA’nın performansını etkileyen en önemli hiper parametrelerdir. Tasarlanan mimaride mini-batch boyutu 64, maksimum epok sayısı 20 ve öğrenme oranı 1e-4 olarak ayarlanmıştır.

**Tablo 1.** Tasarlanan ESA mimarisi

No	Katman İsmi	Açıklama	Özellikler
1	Giriş	Görüntü girişi	Spektrogram
2	'conv1'	Konvolüsyon	7×7 boyutunda 64 adet konvolüsyon filtresi
3	'ReLU1'	ReLU	
4	'pool1'	Maksimum Havuzlama	[2 2] boyutunda kaydırma adımıyla 3×3 havuzlama
5	'conv2'	Konvolüsyon	5×5 boyutunda 128 adet konvolüsyon filtresi
6	'ReLU2'	ReLU	
7	'pool2'	Maksimum Havuzlama	[2 2] boyutunda kaydırma adımıyla 3×3 havuzlama
8	'conv3'	Konvolüsyon	3×3 boyutunda 256 adet konvolüsyon filtresi
9	'ReLU3'	ReLU	
10	'pool3'	Maksimum Havuzlama	[2 2] boyutunda kaydırma adımıyla 3×3 havuzlama
11	'conv4'	Konvolüsyon	3×3 boyutunda 384 adet konvolüsyon filtresi
12	'ReLU4'	ReLU	
13	'pool4'	Maksimum Havuzlama	[2 2] boyutunda kaydırma adımıyla 3×3 havuzlama
14	'fc1'	Tam Bağlı Katman	
15	'ReLU7'	ReLU	
16	'drop7'	Dropout	50% dropout
17	'fc1'	Tam Bağlı Katman	
18	Çıkış	Softmax	

## 5. MAKİNE ÖĞRENİMİNE DAYALI SINIFLANDIRMA (CLASSIFICATION BASED ON MACHINE LEARNING)

Özellik tabanlı yaklaşım ile ESA arasında performans karşılaştırması yapmak için veri setinden çıkarılan özellikler ile makine öğrenimine dayalı sınıflandırma yapılmıştır. Makine öğrenmesine dayalı sınıflandırma işleminde özellik çıkarma ve daha sonrasında ise sınıflandırma işlemi yapılmıştır. İlk olarak MFCC özellik olarak çıkarılmıştır. MFCC, otomatik ses tanımda en sık kullanılan öznelik çıkarma yöntemidir. MFCC özelliklerini çıkarmak için gerekli adımlar sırası ile aşağıda verilmiştir;

- **Çerçeveleme:** Sinyal 25 ms uzunluklarda çerçevelere bölünmüştür ve her çerçeve birbirini %50 oranında örtecek şekildedir.
- **Pencereleme:** Hamming pencereleme tekniği uygulanmıştır.
- **FFT:** Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanmıştır.
- **Mel Filtre:** Kulağın duyma hassasiyetini modellemek için sinyal mel filtre bankasından geçirilmiştir. Bu filtre bankaları üçgen şeklide birbirini %25 oranında örtecek şekilde tasarlanmıştır.
- **Kepstrum Çıkarımı:** Son adım, kepstrum katsayılarının elde edilmesine yönelik bir çalışmadır. Tüm filtre bankalarının enerjilerinin logaritmasını alınır ve Ayrık Kosinüs dönüşümü uygulanarak Mel Frekans Kepstrum katsayıları elde edilir.



Bu işlemlerin ardından 12 MFCC özelliği elde edilmiştir. Son olarak 12-MFCC katsayılarından 6 istatistik değer hesaplanarak 72 boyutlu bir özellik vektörüne elde edilmiştir. Hesaplanan istatistiksel değerler ortalama, standart sapma, minimum, maksimum, mutlak farkın ortalaması ve mutlak farkın standart sapması şeklindedir. Sınıflandırma için ise DVM ve K-NN kullanılmıştır.

**DVM:** Destek vektör makinesi sınıflandırıcısı, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan verilerin sınıflandırılması için iyi sonuçlar veren bir yöntemdir [25]. DVM, konuşma tanıma, metin sınıflandırması ve nesne sınıflandırması gibi birçok alandaki sınıflandırma problemlerinde kullanılmaktadır.

**K-NN:** K-En Yakın Komşular sınıflandırıcı örüntü tanımada kullanılan en basit ve etkili yöntemlerden biridir. Genellikle verimli performans sağlar ve bazı durumlarda doğruluğu, modern sınıflandırıcılardan daha yüksektir. Bu algoritma ile yeni bir nokta verisini sınıflandırmak için bu nokta verisine en yakın K tane eğitim noktası bulunur. Sınıflandırma işlemi, komşularının oy çoğunluğuyla yapılır; sınıflandırma işlemi yapılacak bir eleman, bir uzaklık fonksiyonuyla ölçülen en yakın komşular arasında en yakın olan sınıfa dağıtılır [26].

## 6. DENEYSEL UYGULAMALAR (EXPERIMENTAL APPLICATIONS)

### 6.1 Veri Seti (Dataset)

Bu çalışmada ICBHI 2017 veri seti kullanılmıştır. Bu veri tabanı, farklı kayıt araçlarıyla farklı araştırma ekiplerinin solunum sesleri kayıtlarını toplamasıyla hazırlanmıştır [27]. Veri setinde 126 kişiden alınan 920 ses örneği vardır. Sınıf etiketlerine göre, bu ses dosyalarının her biri, döngülere bölünür. Örnek bir akciğerin sesinin etiketleme detayları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 'ye göre, verilen kayıta yer alan her döngü için, zaman içindeki konumları verilir ve anormal ses içeren veya içermeyen bilgiler ikili bir puan olarak verilir. Çıtır ve üfürüm değerleri sırasıyla 1-0 ise sınıf etiketi “çıtır”, 0-1 ise “üfürüm”, 0-0 ise “normal” ve 1-1 ise “üfürüm ve çıtır” şeklindedir. Çıtır sınıfında 1864, üfürüm sınıfında 886, normal sınıfında 3642, üfürüm ve çıtır sınıfında ise 502 kayıt bulunmaktadır.

*Tablo 2. Örnek ses dosyası için döngü bilgisi*

Döngü	Başlangıç	Son	çıtır (crackle)	üfürüm (wheeze)
Döngü 1	0,541	3,612	1	0
Döngü 2	3,612	5,234	1	0
Döngü 3	5,234	7,426	1	1
Döngü 4	7,426	11,845	1	0
Döngü 5	11,845	14,157	0	1
Döngü 6	14,157	16,124	1	0
Döngü 7	16,124	17,271	1	0
Döngü 8	17,271	19,772	1	0

### 6.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada sınıflandırma işlemi için akciğer ses kayıtlarından elde edilen spektrogramlar ve tasarlanan ESA mimarisi kullanılmıştır. Önerilen yöntemin başarımları kriterleri doğruluk, kesinlik ve F-skoru oranlarına dayalı olarak yapılmıştır. Sınıflandırma problemlerindeki değerlendirme ölçütleri, karışıklık matrisi adı verilen her sınıf için doğru ve yanlış sınıflandırılmış örnek sayılarının bulunduğu bir matris kullanılarak yapılır [28]. Doğruluk ölçümü denklem (6)'da verilmiştir.

- Yanlış pozitifler (YP): negatif sınıftan olan, pozitif olarak tahmin edilen örnekler.
- Yanlış negatifler (YN): gerçek sınıfı pozitif olan negatif olarak tahmin edilen örnekler.
- Doğru pozitifler (DP): pozitif sınıfa ait doğru tahmin edilen örnekler.
- Doğru negatifler (DN): negatif sınıfa ait olarak doğru tahmin edilen örnekler.

$$Doğruluk = \frac{|DN|+|DP|}{|YN|+|YP|+|DN|+|DP|}$$

Kesinlik (P), pozitif bir tahminin doğru olma olasılığını tahmin eden bir ölçüdür. Kesinlik ölçümü denklem (7)'de verilmiştir.

$$Kesinlik(P) = \frac{|DP|}{|DP|+|YP|} \quad 7$$

F-skoru, pozitif kestirim oranı ve duyarlılık ölçülerinin uyumlu bir ortalaması olup denklem (8)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$F - skor = \frac{2*|DP|}{2|DP|+|YP|+|YN|} \quad 8$$

Eğitim ve test için ayrılan verilerin boyutunun ağırlık performansı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, bu veriler 2 farklı şekilde bölünmüştür. İlk deneyde, verilerin %70'i eğitim için ve %30'u test için kullanılır; ikinci deneyde, verilerin %80'i eğitim için ve %20'si test için kullanılmıştır. Tablo 3'de tasarlanan ESA mimarisi kullanılarak veri artırma işleminden önce elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Tablo 3'deki verilere göre verilerin eğitim ve test için sırasıyla %70-%30 bölünmesiyle en yüksek doğruluk %62,47 olarak "üfürüm ve çıtırtı" sınıfından elde edilmiştir. Ayrıca ortalama sınıflandırma başarımı %59,57, ortalama kesinlik değeri %54 ve ortalama F-skoru değeri ise %57,84'tür. Verilerin eğitim ve test için sırasıyla %80-%20 bölünmesiyle en yüksek doğruluk %63,14 olarak "üfürüm ve çıtırtı" sınıfından elde edilmiştir. Ayrıca ortalama sınıflandırma başarımı %60,14, ortalama kesinlik değeri %56,66 ve ortalama F-skoru değeri ise %53,11'dir.

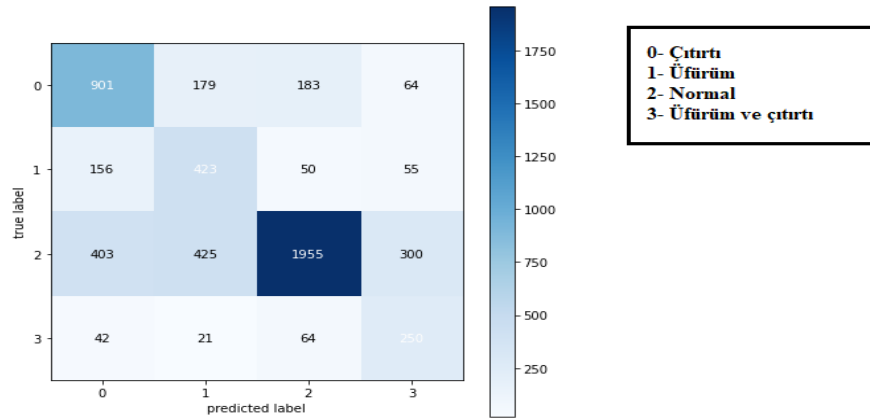
**Tablo 3. Veri Arttırma İşlemi Uygulamadan Önce Elde Edilen Sınıflandırma Sonuçları**

Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi	Sınıf	Doğruluk %	Kesinlik %	F-skoru %
%70- %30	Çıtırtı	58,45	68,21	68,36
	Üfürüm	60,22	38,45	33,41
	Normal	57,14	62,27	72,36
	Üfürüm ve çıtırtı	62,47	46,85	57,25
	<b>Ortalama Başarım</b>	59,57	54,00	57,84
%80- %20	Çıtırtı	61,26	55,36	56,46
	Üfürüm	61,87	50,27	42,35
	Normal	54,29	69,67	75,36
	Üfürüm ve çıtırtı	63,14	51,34	38,28
	<b>Ortalama Başarım</b>	60,14	56,66	53,11

Tablo 4'de tasarlanan ESA mimarisi kullanılarak veri artırma işlemi sonrası elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Verilerin eğitim ve test için sırasıyla %70-%30 bölünmesiyle en yüksek doğruluk %65,28 olarak "çıtırtı sınıfından elde edilmiştir. Ayrıca ortalama sınıflandırma başarımı %62,10, ortalama kesinlik değeri %53,87 ve ortalama F- skoru değeri %50,29'dur. Verilerin eğitim ve test için sırasıyla %80-%20 bölünmesiyle en yüksek doğruluk %67,89 olarak "çıtırtı" sınıfından elde edilmiştir. Ayrıca ortalama sınıflandırma başarımı %64,50, ortalama kesinlik değeri %65,70 ve ortalama F- skoru değeri %59,16'dır. Verilerin eğitim ve test için sırasıyla %80-%20 bölünmesiyle elde edilen sonucuna ait karışıklık matrisi şekil 5'te verilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4'teki sonuçlara göre, eğitim verisinin artırılması ile birlikte sınıflandırma doğruluğu da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum beklenildiği gibidir çünkü görüntülerin farklı varyasyonları (ek eğitim verileri) ile derin ağların eğitilmesi derin modellerin performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

**Tablo 4.** Veri Arttırma İşlemi Uygulandıktan Sonra Elde edilen Sınıflandırma Sonuçları

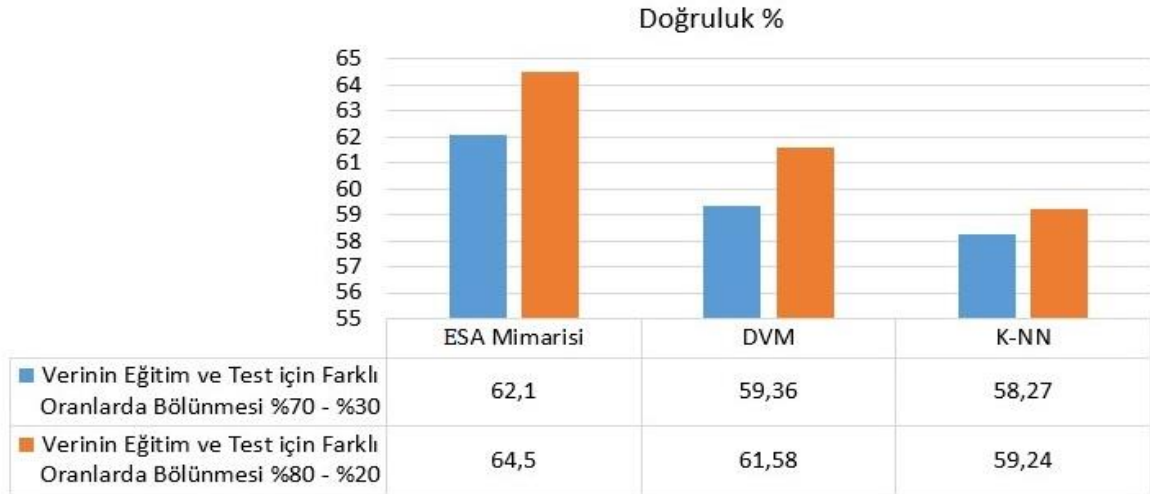
Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi	Sınıf	Doğruluk %	Kesinlik %	F-skoru %
%70- %30	Çıtırıtı	65,28	68,76	68,42
	Üfürüm	60,45	38,24	33,26
	Normal	58,67	62,33	72,17
	Üfürüm ve çıtırıtı	64,00	46,15	27,32
	<b>Ortalama Başarım</b>	<b>62,10</b>	<b>53,87</b>	<b>50,29</b>
%80- %20	Çıtırıtı	67,89	68,47	65,14
	Üfürüm	61,84	62,67	49,38
	Normal	63,41	60,45	71,00
	Üfürüm ve çıtırıtı	66,31	71,23	51,15
	<b>Ortalama Başarım</b>	<b>64,50</b>	<b>65,70</b>	<b>59,16</b>

**Şekil 5.** En İyi Sınıflandırma Sonucuna Ait Karışıklık Matrisi

Tablo 5’ de MFCC özellikleri kullanılarak DVM ve K-NN’den elde edilen sonuçlar verilmiştir. K-NN için k sayısı 5 olarak seçilmiştir. DVM ise polinom çekirdeği kullanılarak eğitilmiştir. Verilerin eğitim ve test için sırasıyla %70-%30 bölünmesiyle en yüksek doğruluk %59,36, en yüksek kesinlik değeri %61 ve en yüksek F- skoru değeri %59 olarak DVM’den elde edilmiştir. Verilerin eğitim ve test için sırasıyla %80-%20 bölünmesiyle ise en yüksek doğruluk %61,58, en yüksek kesinlik değeri %61 ve en yüksek F- skoru değeri %62 olarak yine DVM’den elde edilmiştir. Şekil 6’da makine öğrenimi ve derin öğrenmeye dayalı sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Bu bilgiler ışığında tasarlanan ESA mimarisi özellik tabanlı makine öğrenmesi yöntemlerinden daha iyi performans göstermiştir.

**Tablo 5.** Makine öğrenimine dayalı sınıflandırma sonuçları

Model	Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi	Doğruluk %	Kesinlik %	F-skoru %
K-NN	%70- %30	58,27	0,57	0,54
K-NN	%80- %20	59,24	0,58	0,56
DVM (Polinom)	%70- %30	59,36	0,61	0,59
DVM (Polinom)	%80- %20	61,58	0,61	0,62



**Şekil 6.** Derin Öğrenme ve Makine Öğrenmesinin Performans Karşılaştırılması

Bu çalışmada önerilen yöntemin performansını daha iyi değerlendirebilmek için, elde ettiğimiz bulgularla literatürde kullanılan diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo 6'da akciğer seslerinin sınıflandırılmasıyla ilgili önemli çalışmalar özetlenmektedir.

**Tablo 6.** ICBHI 2017 veri seti için Literatürdeki Çalışmaların Performans Karşılaştırılması

Metot	Kullanılan Özellikler	Sınıflandırıcı	Doğruluk %
Kochetov ve ark. (2018) [29]	MFCC	Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN)	65,70
Demir ve ark. (2019) [1]	ESA modelinden Çıkarılan Derin Özellikler	DVM	65,50
Serbes ve ark. (2017) [30]	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü + Dalgacık (Wavelet)	DVM	57,88
Chambres ve ark. (2018) [31]	Çoklu Özellikler	Karar Ağaçları	49,63
Önerilen Yöntem	Spektrogram	ESA	64,50

Tablo 6'de görüldüğü gibi önerilen yöntem, literatürde kullanılan diğer iki yöntemden daha iyi bir performansa göstermiştir. Bu bilgiler ışığında, önerilen mimari, akciğer ses sinyallerinin sınıflandırma görevi için uygun ve kabul edilebilir bir yöntemdir.

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışma, halk sağlığında en önemli konulardan biri olan akciğer hastalıklarının otomatik teşhisine odaklanmaktadır. Literatürde bu konuda birçok çalışma yapılmıştır, ancak bu çalışmaların çoğu geleneksel yöntemlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada akciğer seslerinin tanınması probleminde sınıflandırma performansını artırmak için derin öğrenme ele alınmaktadır. Önerilen yöntem, literatürde popüler olan ICBHI 2017 veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. İlk olarak akciğer ses sinyalleri ön işlemden geçirilerek spektrogramlar çıkarılmıştır. Spektrogram görüntülerine ek eğitim veri örnekleri oluşturmak için 5 farklı veri arttırma işlemi uygulanmıştır. 12 katmanlı ESA tasarlanarak ilk katmana spektrogram görüntüleri verilerek sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Veri arttırma öncesi ortalama %60,14 sınıflandırma başarımları elde edilmiştir. Veri arttırma sonrası ise ortalama %64,50 sınıflandırma başarımları elde edilmiştir. Beklendiği gibi, veri arttırma işleminin uygulanmasından sonra doğruluk oranında arttığı deney sonuçlarından gözlenmektedir. Ayrıca önerilen yöntemin performansını diğer makine öğrenmesi yöntemleri ile

karşılaştırmak için veri seti örneklerinden MFCC özellikleri çıkarılarak DVM ve K-NN ile sınıflandırma işlemi yapılmıştır. MFCC özellikler ile en yüksek sınıflandırma başarımı %61,58 olarak DVM'den elde edilmiştir. Önerilen yöntem, özellik çıkarımına dayanan çalışmalarından daha iyi performans göstermiştir. İleriki çalışmalarda, tekrarlayan sinir ağlarının ESA ile kombinasyonlarını kullanması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] F. Demir, A. Sengur, and V. Bajaj, "Convolutional neural networks based efficient approach for classification of lung diseases," *Heal. Inf. Sci. Syst.*, vol. 8, no. 1, p. 4, Dec. 2019, doi: 10.1007/s13755-019-0091-3.
- [2] S. İçer and Ş. Gengeç, "Classification and analysis of non-stationary characteristics of crackle and rhonchus lung adventitious sounds," *Digit. Signal Process.*, vol. 28, pp. 18–27, 2014, doi: 10.1016/j.dsp.2014.02.001.
- [3] R. Naves, B. H. G. Barbosa, and D. D. Ferreira, "Classification of lung sounds using higher-order statistics: A divide-and-conquer approach," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 129, pp. 12–20, 2016, doi: 10.1016/j.cmpb.2016.02.013.
- [4] G.-C. Chang and Y.-P. Cheng, "Investigation of noise effect on lung sound recognition," *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. IEEE, 2008, doi: 10.1109/icmlc.2008.4620605.
- [5] S. Reichert, R. Gass, C. Brandt, and E. Andrès, "Analysis of respiratory sounds: state of the art," *Clin. Med. Circ. Respirat. Pulm. Med.*, vol. 2, pp. 45–58, May 2008, doi: 10.4137/ccrpm.s530.
- [6] A. Kandaswamy, C. S. Kumar, R. P. Ramanathan, S. Jayaraman, and N. Malmurugan, "Neural classification of lung sounds using wavelet coefficients," *Comput. Biol. Med.*, vol. 34, no. 6, pp. 523–537, 2004, doi: https://doi.org/10.1016/S0010-4825(03)00092-1.
- [7] S. ULUKAYA, G. SERBES, İ. ŞEN, and Y. P. KAHYA, "Akciğer Solunum Seslerinin Spektral Öznitelikler ile Sınıflandırılması," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 22, no. 2, p. 711, 2017, doi: 10.19113/sdufbed.84471.
- [8] A. Sovijärvi *et al.*, "Characteristic of breath sounds and adventitious respiratory sounds," *Charact. Breath Sounds Adventitious Respir. Sounds*, vol. 10, pp. 591–596, Jan. 2000.
- [9] G. Serbes, C. O. Sakar, Y. P. Kahya, and N. Aydin, "Pulmonary crackle detection using time–frequency and time–scale analysis," *Digit. Signal Process.*, vol. 23, no. 3, pp. 1012–1021, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.dsp.2012.12.009.
- [10] F. Jin, F. Sattar, and D. Y. T. Goh, "New approaches for spectro-temporal feature extraction with applications to respiratory sound classification," *Neurocomputing*, vol. 123, pp. 362–371, 2014, doi: 10.1016/j.neucom.2013.07.033.
- [11] M. Bahoura, "Pattern recognition methods applied to respiratory sounds classification into normal and wheeze classes.," *Comput. Biol. Med.*, vol. 39, no. 9, pp. 824–843, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.compbiomed.2009.06.011.
- [12] A. D. Orjuela-Cañón, D. F. Gómez-Cajas, and R. Jiménez-Moreno, "Artificial Neural Networks for Acoustic Lung Signals Classification," *Advanced Information Systems Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 214–221, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-12568-8\_27.
- [13] S. O. Maruf, M. U. Azhar, S. G. Khawaja, and M. U. Akram, "Crackle separation and classification from normal Respiratory sounds using Gaussian Mixture Model," *2015 IEEE 10th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*. IEEE, 2015, doi: 10.1109/iciinfs.2015.7399022.

- [14] M. Yeginer and Y. P. Kahya, "Elimination of vesicular sounds from pulmonary crackle waveforms," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 89, no. 1, pp. 1–13, 2008, doi: 10.1016/j.cmpb.2007.10.002.
- [15] G. Serbes, S. Ulukaya, and Y. P. Kahya, "An Automated Lung Sound Preprocessing and Classification System Based On Spectral Analysis Methods," *Precision Medicine Powered by pHealth and Connected Health*. Springer Singapore, pp. 45–49, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-7419-6\_8.
- [16] G. Chambres, P. Hanna, and M. Desainte-Catherine, "Automatic Detection of Patient with Respiratory Diseases Using Lung Sound Analysis," *2018 International Conference on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI)*. IEEE, 2018, doi: 10.1109/cbmi.2018.8516489.
- [17] D. Bardou, K. Zhang, and S. M. Ahmad, "Lung sounds classification using convolutional neural networks," *Artif. Intell. Med.*, vol. 88, pp. 58–69, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.artmed.2018.04.008.
- [18] C. Jácome, J. Ravn, E. Holsbø, J. C. Aviles-Solis, H. Melbye, and L. Ailo Bongo, "Convolutional Neural Network for Breathing Phase Detection in Lung Sounds," *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 8, p. 1798, Apr. 2019, doi: 10.3390/s19081798.
- [19] K. Kochetov, E. Putin, M. Balashov, A. Filchenkov, and A. Shalyto, "Noise Masking Recurrent Neural Network for Respiratory Sound Classification," *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2018*. Springer International Publishing, pp. 208–217, 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01424-7\_21.
- [20] Y. Fu and C. Aldrich, "Flotation froth image recognition with convolutional neural networks," *Miner. Eng.*, vol. 132, pp. 183–190, 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2018.12.011.
- [21] A. GÜLCÜ and Z. KUŞ, "Konvolüsyonel Sinir Ağlarında Hiper-Parametre Optimizasyonu Yöntemlerinin İncelenmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 7. Gazi Üniversitesi, pp. 503–522, 2019, doi: 10.29109/gujsc.514483.
- [22] D. C. Cireşunđinedan, U. Meier, J. Masci, L. M. Gambardella, and J. Schmidhuber, "Flexible, High Performance Convolutional Neural Networks for Image Classification," in *Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume Volume Two*, 2011, pp. 1237–1242.
- [23] M. Bilal Er and I. B. Aydilek, "Music emotion recognition by using chroma spectrogram and deep visual features," *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 12, no. 2, 2019, doi: 10.2991/ijcis.d.191216.001.
- [24] J. Salamon and J. P. Bello, "Deep Convolutional Neural Networks and Data Augmentation for Environmental Sound Classification," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 279–283, 2017, doi: 10.1109/LSP.2017.2657381.
- [25] "Support Vector Machines, 1992; Boser, Guyon, Vapnik," in *SpringerReference*, Springer-Verlag.
- [26] C. Li *et al.*, "Using the K-Nearest Neighbor Algorithm for the Classification of Lymph Node Metastasis in Gastric Cancer," *Comput. Math. Methods Med.*, vol. 2012, pp. 1–11, 2012, doi: 10.1155/2012/876545.
- [27] B. M. Rocha *et al.*, "An open access database for the evaluation of respiratory sound classification algorithms," *Physiol. Meas.*, vol. 40, no. 3, p. 35001, 2019, doi: 10.1088/1361-6579/ab03ea.
- [28] M. B. ER and H. ÇİĞ, "Türk Müziđi Uyarınları Kullanılarak İnsan Duygularının Makine Öğrenmesi Yöntemi İle Tanınması," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 458–474, 2020, doi: 10.29109/gujsc.687199.
- [29] K. Kochetov, E. Putin, M. Balashov, A. Filchenkov, and A. Shalyto, "Noise Masking Recurrent Neural Network for Respiratory Sound Classification," *Artificial Neural Networks and Machine*

- Learning – ICANN 2018*. Springer International Publishing, pp. 208–217, 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01424-7\_21.
- [30] G. Serbes, S. Ulukaya, and Y. P. Kahya, “An Automated Lung Sound Preprocessing and Classification System Based On Spectral Analysis Methods,” *Precision Medicine Powered by pHealth and Connected Health*. Springer Singapore, pp. 45–49, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-7419-6\_8.
- [31] G. Chambres, P. Hanna, and M. Desainte-Catherine, “Automatic Detection of Patient with Respiratory Diseases Using Lung Sound Analysis,” *2018 International Conference on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI)*. IEEE, 2018, doi: 10.1109/cbmi.2018.8516489.

## Design and Development of Virtual Reality System for Manufacturing Engineering Education

 Sinan UĞUZ<sup>1,\*</sup>  Bezmican ZEHİR<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Isparta University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 32200, ISPARTA

<sup>2</sup> Isparta University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering, 32200, ISPARTA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 04/07/2020

Revision: 02/10/2020

Accepted: 05/10/2020

#### Highlights

- VR Hardware.
- CNC education with VR
- Design with Unity

#### Keywords

Virtual Reality

Virtual laboratory

CNC

Unity

In this study, simulation software was developed that allows students to work with CNC. In addition, thanks to the developed VR hardware, it is possible to write G code and see the results. In addition to the G code that the student has to type, the virtual keyboard and CNC machine area are seen.

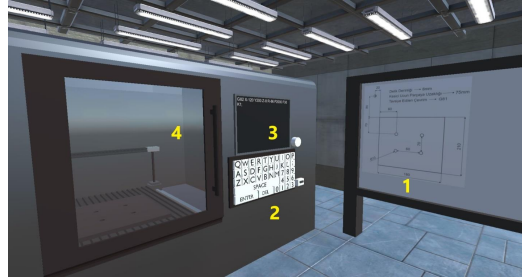


Figure A. Writing G codes with command controller

**Purpose:** The aim of this study, It is the development of a virtual reality application that will help students in CNC machine training. When the literature is examined, it is seen that the studies are mostly focused on the preparation of virtual reality contents. Unlike our study, a complete virtual reality application including both hardware and content software is proposed.

**Theory and Methods:** In the study, firstly, a virtual reality hardware consisting of a virtual reality headset and a joystick was developed. In the other stage, virtual reality simulation application was developed. Drawing of 3D solid models of objects and texture overlays were created with the Blender program. Using Unity, G codes and codes of axis movements of CNC machine were written.

**Results:** In this study, the following objectives have been successfully achieved.

(a) Obtaining angular changes, (b) Providing real-time wireless communication, (c) Realization of simulation software with Unity, (d) Writing G code functions, (e) Three-dimensional printing and assembly. Various difficulties were encountered in the development of virtual reality hardware and the content prepared with Unity. These challenges are discussed in Section 3.

**Conclusion:** Unlimited laboratory facilities are not available in engineering education. The high initial setup costs and the need for constant updating are the main reasons for this situation. Many studies emphasize that virtual laboratories supported by virtual reality applications can be a solution to this deficiency. In this study, a system that enables the examination of CNC machines by using virtual reality technology in computer aided manufacturing courses is proposed.





## İmalat Mühendisliği Eğitimi için Sanal Gerçeklik Sistemi Tasarımı ve Geliştirilmesi

Sinan UĞUZ<sup>1,\*</sup> Bezmican ZEHİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 32200, ISPARTA

<sup>2</sup>İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 32200, ISPARTA

### Öz

Mühendislik eğitiminin önemli bir parçasını oluşturan laboratuvarlar, birçok avantajın yanı sıra yüksek ilk kurulum maliyetleri, gelişen teknolojiye göre güncellenme gereksinimi ve sınırlı kullanım süreleri gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Son yıllarda gerçek laboratuvarların bir alternatifi olarak düşünülen sanal laboratuvar uygulamaları üzerine önemli çalışmalar yürütülmektedir. Sanal laboratuvar çalışmalarının önemli bir bölümü de sanal gerçeklik teknolojisine dayanmaktadır. Makine mühendisliği ve imalat mühendisliği gibi bölümlerde okutulan bilgisayar destekli imalat derslerinde, computer numerical control (CNC) makinelerini kontrol etmek için uygulama yapma gereksinimi duyulur. Bu çalışmada, bu gereksinimin karşılanması amacıyla sanal gerçeklik teknolojisi kullanarak geliştirilen bir sistem önerilmiştir. Öncelikle, sanal gerçeklik başlığı ve kumanda kolundan oluşan bir sanal gerçeklik donanım seti tasarlanmıştır. Daha sonra ise Unity tabanlı bir simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım ile CNC makinesinde farklı G kodu uygulamalarının sonuçlarının öğrenciler tarafından görülmesi sağlanmıştır. İçerik geliştirilmesinin yanı sıra düşük maliyetli sanal gerçeklik donanımının da üretilmesi, bu çalışmayı benzerlerinden ayıran unsurlardan birisidir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 04/07/2020  
Düzeltilme: 02/10/2020  
Kabul: 05/10/2020

### Anahtar Kelimeler

Sanal Gerçeklik  
Sanal Laboratuvar  
CNC  
Unity

### Keywords

Virtual Reality  
Virtual laboratory  
CNC  
Unity

## Design and Development of Virtual Reality System for Manufacturing Engineering Education

### Abstract

The laboratories, which form an important part of engineering education, also have some disadvantages such as high initial setup costs, the need to be updated according to the developing technology and limited usage times besides many advantages. In recent years, important studies have been carried out on virtual laboratory applications, which are considered as an alternative to real laboratories. A considerable part of virtual laboratory studies is based on virtual reality technology. It is needed to perform an application to control computer numerical control (CNC) machines in computer aided manufacturing courses taught in departments such as mechanical engineering and manufacturing engineering. In this study, a system developed using virtual reality technology is proposed to meet this requirement. Firstly, a virtual reality hardware set consisting of a virtual reality headset and joystick was designed. Later, a Unity-based simulation software was developed. With this software, students can see the results of different G code applications on the CNC machine. In addition to content development, the production of low-cost virtual reality hardware also is one of the features that distinguish the study.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik eğitimi, öğrencilere teorik derslerin yanı sıra deneysel araştırma ve projeler geliştirerek pratik deneyimlerin de kazandırılmasını gerektiren zorlu bir süreci temsil eder. Bu pratik uygulamalar öğrencilerin gerçek yaşamda karşılaştıkları farklı senaryolara hazır hale gelmelerinde yardımcı olmaktadır. Fiziki laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen pratik eğitimin faydalarının yanı sıra bazı kısıtlamalarının da olması bu eğitimin yaygınlaşmasında önemli bir engel olarak görülebilir. Zor veya pahalı deneysel koşullar, yeni ekipmanlar, testlerin gerçekleştirilmesiyle ilgili riskler, karmaşık matematiksel hesaplamalar ve öğrencilerin erişim süreleri fiziksel araştırmaların sürecini önemli ölçüde kısıtlamaktadır [1]. Tüm dünyada eğitim müfredatlarının genellikle teorik ve pratik dersler olarak iki kısımdan oluştuğu görülmektedir. Pratik derslerdeki laboratuvar uygulamalarında, öğrencilerin uygulama araçlarına sınırlı erişimi ve araçları tam

olarak kullanma izinlerinin kısıtlı olması, istenen uygulama eğitiminin önündeki engeller arasında gösterilebilir [2].

Son dönemlerde sanal ortam uygulamalarının mühendislik eğitimi için yardımcı bir uygulama aracı olarak kullanımı konusunda önemli bir yol kat edildiği görülmektedir [3]. Özellikle sanal gerçeklik tabanlı uygulamaların sanal ortam uygulamaları arasında önemli bir yere sahip olduğu gözlenmektedir. Sanal gerçeklik, genellikle dinamik olarak değişen ve hareket edebilen bir senaryoya sahip, bilgisayar tarafından oluşturulan ve etkileşimli bir ortam sağlayan bir teknolojidir. Yapay olarak oluşturulmuş bir dünyada, kullanıcının fiziksel varlığının benzetimi sayesinde kullanıcı ve sanal ortamın etkileşime girmesi sağlanır [4,5]. Özellikle bu çalışmanın konusunu da içeren mühendislik eğitiminde sanal gerçeklik uygulamaları ile ilgili olarak literatürde bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Akbulut vd., (2018) çalışmalarında, yazılım mühendisliği eğitiminde öğrencilerin kavramakta zorlandığı çeşitli sıralama algoritmalarının sanal gerçeklik sistemleri ile öğrenilmesinin başarıya olan etkisini araştırmışlardır. Bir grup öğrenci geleneksel tekniklerle eğitim alırken diğer grup ise sanal gerçeklik sistemi ile eğitim almıştır. Performans değerlendirmesi için yapılan çoktan seçmeli testlerin sonucuna göre sanal gerçeklik sistemi ile eğitim almış öğrencilerin %12 oranında daha başarılı oldukları görülmüştür [6]. Bir diğer çalışmada ise Ouyang vd., (2018), kimya mühendisliği öğrencilerine üretim uygulamalarında yardımcı olmayı amaçlayan Unity3D tabanlı bir sanal uygulama platformu önerilmiştir. Çalışmada bazı büyük pompa, vana ve boru hatlarının yer aldığı gerçek bir kimyasal tesisin bölümleri, Unity oyun motorunda canlandırılmıştır. Çalışma sonunda öğrencilerden sistemin erişilebilirliği, kolaylığı, daha sonra kullanıp kullanmayacakları gibi unsurları ölçecek şekilde anket formu doldurulması istenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgulara göre, öğrencilerin sanal uygulama platformu hakkında olumlu görüşler bildirdiği görülmüştür [7].

Tarng vd., (2018) çalışmalarında, LCD'lerin (liquid crystal display) fotoelektrik etkisinin öğrencilere öğretilmesi için bir sanal laboratuvar geliştirmişlerdir. Geliştirilen uygulama ile kullanıcıların, CRT (cathode ray tube), plazma ekran ve LCD çalışma prensiplerini anlama, RGB (red green blue) renk modellerinin karşılaştırılması, polarize LCD panelden ışığı kontrol etmek için elektrik alanının voltajını değiştirme, LCD'ye ait kristal hizalama yönünü kontrol etmesi için elektrik alanı değiştirmelerine olanak tanınmaktadır [8]. Lee ve Shvetsova (2019) ise Kore Üniversitesinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, robotik dersi için iki farklı öğrenme grubu oluşturmuşlardır. Bunlardan ilki konuların sanal gerçeklik destekli olarak anlatıldığı bir sınıf diğeri ise geleneksel eğitimin verildiği bir sınıf olarak belirlenmiştir. Çalışma ile gerçekleştirilen ölçme ve değerlendirme teknikleri ile sanal gerçeklik sınıfındaki yetkinlik gelişimi ile geleneksel eğitimin verildiği sınıftaki yetkinlik düzeyi arasında, sanal gerçeklik sınıfı lehine önemli fark olduğu gözlenmiştir [9]. Bir diğer mühendislik tabanlı sanal gerçeklik uygulamasında ise Lu vd. (2020), deprem sonrasında oluşan yangınların hem itfaiyeciler hem de mahsur kalan kişiler için önemli bir tehlike oluşturduğundan yola çıkarak, bina bilgi modeli ve sanal gerçekliğe dayalı bir iç mekan deprem sonrası yangın kurtarma senaryosunun simülasyon çerçevesini önermişlerdir. Yangın kurtarma senaryosunu oluşturmak için önerilen yöntem kullanılarak 19 katlı bir hastane modeli üzerinde çalışma yürütülmüştür. Çalışma sonucunda dumanın kurtarma üzerindeki etkisinin düşen enkazdan daha önemli olduğu ortaya koyulmuştur [10].

Qin vd.(2020) ise nükleer enerji mühendisliği alanında sanal gerçeklik uygulamaları için örnek bir çalışma ortaya koymuşlardır. Çalışmada, tasarım aşamasında olan Çin füzyon mühendisliği test reaktörü için plazma geometrisi, stabilite ve boşaltma işlemlerinin araştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca elektromanyetik, termodinamik ve yapısal özelliklere ait mühendislik analizlerinin sanal gerçeklik uygulamaları ile üç boyutlu olarak ele alınması ve eğitim amaçlı kullanılması üzerine çalışma yapılmıştır [11]. Wang vd. (2020) ise çalışmalarında, inşaat mühendisliği öğrencilerinin devam eden inşaat çalışmalarını deneyimlemeleri için sanal bir inşaat alanı olarak sanal gerçeklik ortamı oluşturmuşlardır [12]. Tüm bu çalışmaların ortak özelliği kendi mühendislik alanları ile ilgili sanal gerçeklik canlandırmalarını içeren yazılımlar içermesidir. Bizim çalışmamızda da imalat mühendisliğinde kullanılabilen bir sanal gerçeklik yazılımı hazırlanmıştır. Ancak bizim çalışmamızın diğer çalışmalardan en belirgin farkı diğer çalışmalarda hazır olarak kullanılan sanal gerçeklik donanımlarının tarafımızca oluşturulmasıdır.

Sanal gerçeklik teknolojisi ile sanal gerçeklik başlığı, kumanda kolu ve eldivenler gibi yardımcı araçlar kullanılarak, çeşitli programlar ile geliştirilen sanal ortam sahnesinin içinde hareket edebilme kabiliyeti kazandırılır [13]. Son yıllarda sanal gerçeklik donanımlarının fiyatlarının daha düşük seviyelere gelmesi, özellikle kurulum maliyeti yüksek olan çoğu mühendislik laboratuvarı yerine sanal gerçeklik teknolojisinin

alternatif bir eğitim aracı olarak kullanılmasının önünü açmaktadır. Sanal gerçeklik uygulamalarının çeşitlendirilmesi ve farklı dersler ile ilgili içeriklerin geliştirilmesi de bir diğer önemli konudur. Daha çok oyun sektöründe bir pazara sahip olan sanal gerçeklik sistemleri son dönemlerde eğitim uygulamaları ile de gündeme gelmektedir. Birçok araştırmacı sanal gerçeklik uygulamalarının öğrencilerin eğitimlerindeki katkılarına dönük çalışmalar yürütmektedir. Tıp [14], mühendislik [15], mimarlık [16] ve temel bilimler [17] gibi alanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda, genel olarak geliştirilen içeriklerin başarıya etkisi, sanal gerçeklik donanımlarının eğitim için uygun olup olmadığı gibi konulara odaklanıldığı görülmektedir.

CNC eğitiminin verildiği ilgili mühendislik bölümlerindeki eğitimin mevcut durumu incelendiğinde, uygulamalı dersler bakımından aşağıda ifade edilen bazı önemli zorluklar ön plana çıkmaktadır.

1. CNC eğitimi için gerekli olan çeşitli CNC tezgâhlarının (CNC torna tezgâhları, CNC freze tezgâhı, CNC dik işleme merkezi, C eksenli CNC torna, CNC dikey torna, CNC yatay torna, taşlama tezgâhı, ahşap işleme CNC oyma makinesi vb.) yer aldığı laboratuvarların ilk maliyetlerinin yüksek olması,
2. Gelişen teknoloji ile CNC eğitimi için gerekli laboratuvar araç ve gereçlerinin güncellenme ihtiyacının doğması ve bu sebeple büyük bütçelere ihtiyaç duyulması,
3. Gerek gerçek laboratuvarları kullanan öğrenci sayılarının fazla olması gerek ise cihazların yüksek hassasiyete sahip olabilmelerinden dolayı, öğrencilerin laboratuvar imkânlarından bireysel olarak arzulan sıklıkta istifade edememeleri.

Daha çok maliyet odaklı bu problemlere sanal gerçeklik tabanlı uygulamalar ile alternatif bir çözüm üretilebilir. Günümüzde endüstriyel imalat alanındaki önemli teknolojilerinden biri olan CNC teknolojisi, çeşitli bileşen ve kesicilerin sayısal bilgilerle yer değiştirilmesinin kontrol edilmesi suretiyle, parça işleme süreçlerinin gerçekleştirildiği bir teknolojidir. Artık imalat sektörünün vazgeçilmezi haline gelen CNC teknolojisi, sadece büyük ölçekli değil küçük ölçekli firmalarda da tercih edilmektedir [18]. Bu sebeple CNC makinelerinin kullanımı için iş gücü talebi devam etmekte olup, nitelikli makine ya da imalat mühendisi yetiştiren yükseköğretim kurumlarında bu teknoloji için bilgisayar destekli imalat gibi dersler bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, bilgisayar destekli imalat vb. derslerde, öğrencilerin CNC tezgâh kullanarak gerçekleştirmek zorunda oldukları uygulamaları, sanal gerçeklik teknolojisi kullanarak tecrübe edinmelerini sağlayan bir sistem geliştirmektir. Literatür incelendiğinde, araştırmaların daha çok sanal gerçeklik içeriklerinin hazırlanmasına dönük olduğu görülmektedir. Bizim çalışmamızda farklı olarak, içerik hazırlanmasının yanı sıra sanal gerçeklik donanımlarının geliştirilerek hem donanım hem de içerik yazılımı içeren komple bir sanal gerçeklik uygulaması önerilmiştir.

Mevcut sanal gerçeklik donanımlarının fiyat performans açısından son dönemlerde daha uygun hale gelmeye başladığı görülse de yeterli düzeyde değildir. Çünkü laboratuvarlarda çok sayıda öğrencinin daha etkili bir şekilde bu donanımları kullanabilmesi için yeterli sayıda olmaları beklenir. Bu bakımdan bizim çalışmamız maliyeti düşük ama etkili bir sanal gerçeklik donanımı önerdiği için, değerli ve literatürdeki benzer araştırmalardan farklı olarak görülmektedir. Ayrıca sanal gerçeklik içeriklerinin geliştirilmesi hem üç boyut çizim yeteneği hem de ileri düzey programlama bilgisi gerektirdiği için bu alanda üretilen ve eğitime kazandırılan tüm çalışmaların değerli olduğu düşünülmektedir.

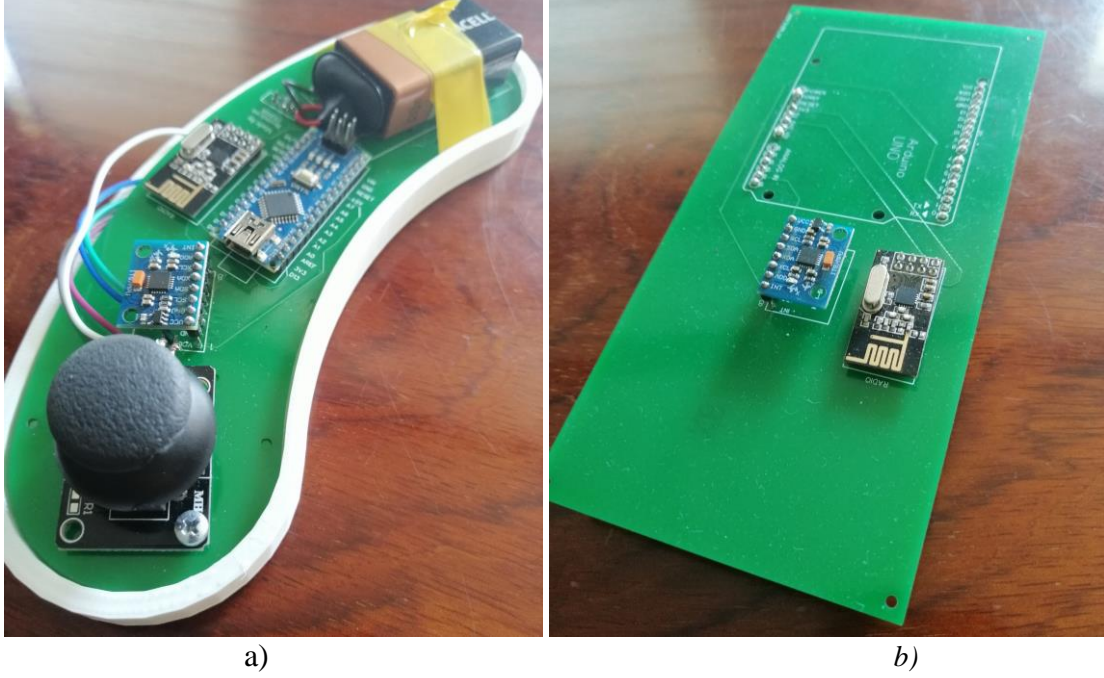
## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND MEDHOD)

Çalışmanın iki temel alt hedefi bulunmaktadır. Birinci alt hedef, sanal gerçeklik başlığı ve kumanda kolundan oluşan bir sanal gerçeklik donanımı geliştirilmesidir. İkinci alt hedef ise öğrencilerin CNC G kodları ile denemeler yapabilecekleri bir simülasyon yazılımının gerçekleştirilmesi olarak ifade edilebilir. Bu hedefler Bölüm 2.1 ve Bölüm 2.2’de detaylı olarak incelenmiştir.

### 2.1. Sanal Gerçeklik Donanımının Geliştirilmesi (Development of Virtual Reality Hardware)

Geliştirilen sanal gerçeklik donanımı (SGD), sanal gerçeklik başlığı ve kumanda kolu kontrolcüsü olmak üzere iki farklı modülden oluşmaktadır. Her iki modül MPU6050 ivme/jiroskop sensörü, analog kumanda kolu, nRF24L01 radyo modülü ve güç kaynağı birimlerine sahiptir. Sanal gerçeklik gözlüğünde Arduino

Nano geliştirme kartı kullanılırken, kumanda kolu kontrolcüsü devresi için Arduino Uno R3 modülü kullanılmıştır. SGD'nin tüm kullanıcılar tarafından kolaylıkla kullanımı için ergonomik tasarımı önemli bir gerekliliktir. Bu sebeple gerek sanal gerçeklik başlığı ve gerekse kumanda kolu kontrolcüsü donanımlarına ait devre kartları, bu gerekliliğe uygun olarak Şekil 1'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır.



**Şekil 1.** SGD'ye ait a) Kumanda kolu kontrolcüsü b) Sanal gerçeklik başlığı devresi

SGD'nin katı model çizimlerinde kumanda kolu kontrolcüsü için özgün bir çizim gerçekleştirilirken, sanal gerçeklik başlığı için açık kaynaklı olarak elde edilebilen AZ360VR modeli tercih edilmiştir. Şekil 2'de SGD'nin üç boyutlu yazıcıdan çıkarıldıktan sonraki görüntüleri görülmektedir. Sanal gerçeklik başlığı içerisine 800x400 ekran çözünürlüklü ve 5 inç büyüklüğünde bir LCD ekran ile 40mm'lik iki adet mercek yerleştirilmiştir.

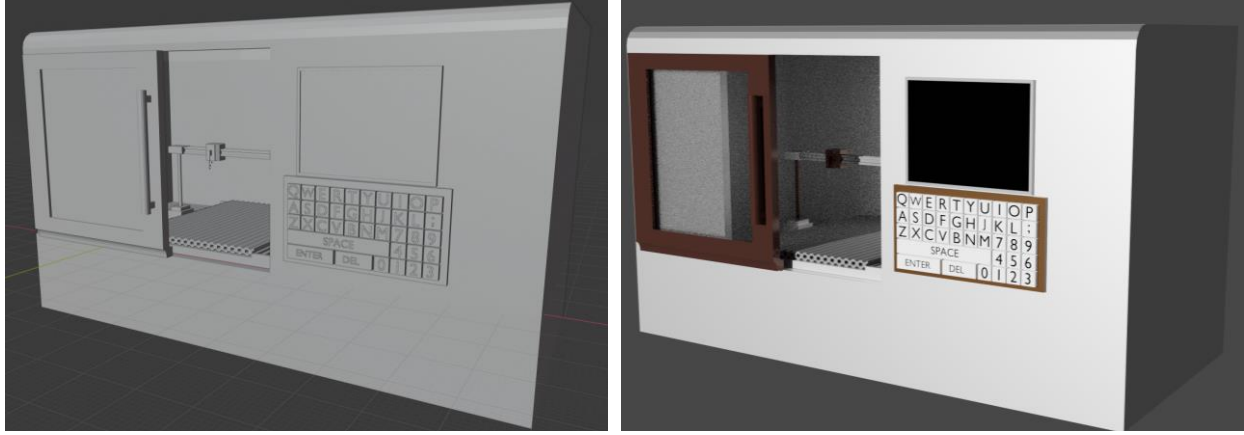


**Şekil 2.** Geliştirilen SGD'nin montajlanmış görüntüsü

Geliştirilen projede, AZ360-VR'in ticari olmayan amaç ile kullanıma sunulan sanal gerçeklik gözlüğünün katı modelinin bir kısmı kullanılmıştır. Ancak ivme/gyro sensörü ve denetleyici bulunduran elektronik devre tasarımı özgün bir şekilde geliştirilmiştir. Ayrıca, kumanda kolu kontrolcüsü katı modeli ve elektronik devresi de özgün bir şekilde geliştirilmiştir.

## 2.2. Sanal Gerçeklik Simülasyon Uygulamasının Geliştirilmesi (Development of Virtual Reality Simulation Application)

CNC programlama üzerine gerçekleştirilen sanal gerçeklik uygulamasının ilk aşamasında, kullanılacak nesnelerin üç boyutlu katı modellerinin çizimi ve doku kaplamasının yapılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bu aşamanın gerçekleştirilmesi için Blender adlı program kullanılmıştır. Blender, katı model oluşturma, doku kaplama, animasyon oluşturma, kinematik, parçacık efektleri ve fizik kuralları gibi birçok özelliği barındıran bir programdır. Şekil 3'de Blender ile üç boyutlu modellemesi yapılmış CNC tezgâh modeli ve onun doku kaplaması yapılmış hali görülmektedir.



Şekil 3. Blender ile çizilen a) CNC tezgâh modeli b) Doku kaplamalı CNC tezgâh modeli

CNC programlama üzerine gerçekleştirilen sanal gerçeklik uygulamasının sonraki aşamasında, CNC tezgâhın eksen hareketlerine ait kodların yazımı ve simülasyon programında kullanıcının aktif olarak kullanmakta olduğu G kodlarına ait kodların yazılması gerçekleştirilmiştir. Bunun için iki boyut/üç boyut uzaya ve geliştirme ortamına sahip ve C# dili ile desteklenerek nesnelerin programlanabildiği bir oyun motoru olan Unity kullanılmıştır.

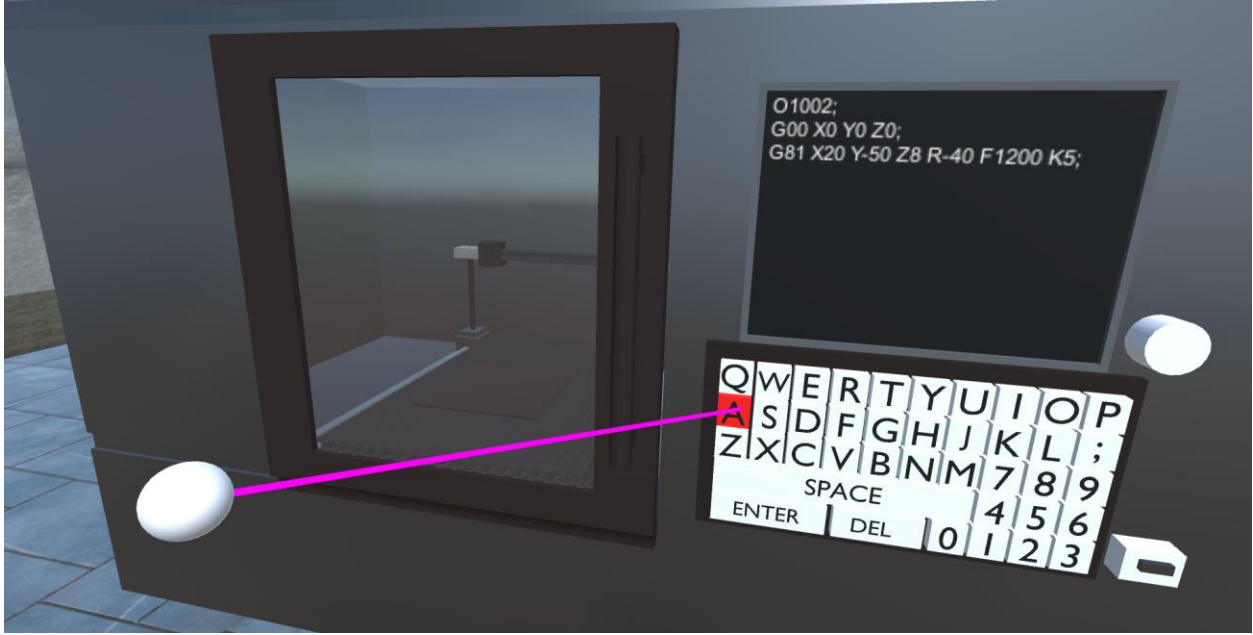
CNC tezgâhların hareket kabiliyetlerini yönlendirmek için G programlama dili kullanılır. Dolayısıyla CNC tezgâhları farklı özellikli olsa bile aynı G kodları üretildiğinde planlanan işleme göre elde edilen sonuç aynı olmaktadır. Bu sebepten dolayı bilgisayar destekli üretim uygulamalarında CNC tezgâh ile üretilmek istenen sonucun doğru G kodları ile oluşturulması önemlidir. Bu çalışmada öğrencilerin denemesi için tasarlanan G kodları Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Hedef Transformör Parametreleri

G kodu	Açıklama
G81 X.. Y.. Z.. R.. F.. K.. (Düz delik delme çevrimi)	X:Delik merkez koordinatı, Y:Delik merkez koordinatı, Z:Delik derinliği, R:Emniyet mesafesi, F:İlerleme (mm/dak.) X, Y, R noktalarında Z derinliğinde F hızında K tekrarlarla delik delme çevrimi.
G82 X.. Y.. Z.. R.. P.. F.. K.. (Delik sonunda beklemeli delik delme çevrimi)	P parametresi delik dibinde bekleme süresini (ms) temsil eder.
G83 X.. Y.. Z.. R.. Q.. F.. K.. (Gagalı delin delik delme çevrimi)	Q parametresi her K dalışında ilerleme miktarını temsil eder.
G84 X.. Y.. Z.. R.. P.. F.. K.. (Sağ kılavuz çekme çevrimi)	X, Y, R noktalarında Z derinliğinde F hızında K tekrarlarla sağ kılavuz çekme çevrimi.

CNC tezgâhın X, Y ve Z ekseninin her biri için farklı bir fonksiyon yazılmıştır. Bu işlemin yapılmasının amacı her eksenin adım hassasiyetinin minimum ve maksimum noktalarının simülasyon uzayı içerisinde

farklı noktalarda olmasıdır. G kodlarının her biri içinde bu tekrarlamaya işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’de görüldüğü gibi kullanıcı kumanda kontrolcüsü ile tasarlanan klavyeyi kullanarak G kodlarını yazabilmekte ve klavyenin üzerinde yer alan ekranda yazdığı G kodlarını anlık olarak görebilmektedir.

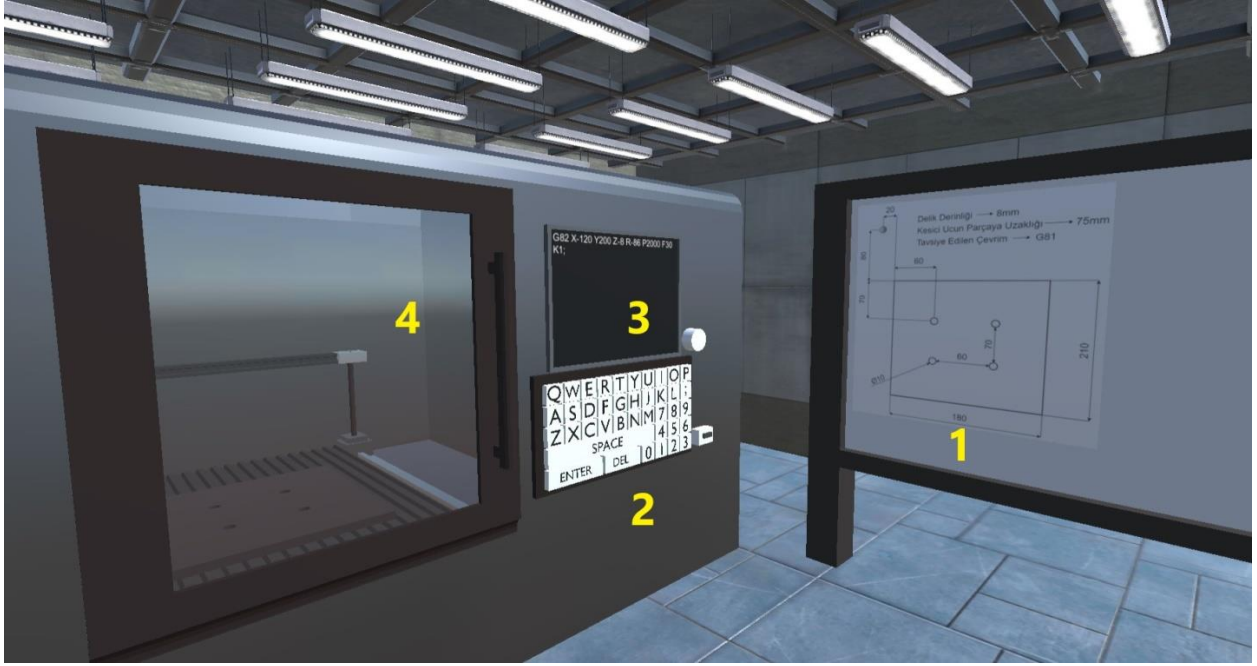


**Şekil 4.** Kumanda kontrolcüsü ile G kodlarının girilmesi

CNC kodlama yapılmasına imkân sağlayan klavyenin tuşları katı model küpler halinde birbirinden bağımsız nesnelere sahiptir. Tasarlanan bu nesnelere childObject olarak ayarlanarak sanal gerçeklik ortamına uygun klavye meydana getirilmiştir. Kullanıcının klavye tuş takımı ile etkileşime geçmesi, Unity oyun motoru tarafından sağlanan Raycast mekanizması ile sağlanmıştır. Bu mekanizma sayesinde üç boyutlu uzayda belirli bir  $A=(x,y,z)$  noktasından üç boyutlu yönelim vektörü  $V=(x,y,z)$  doğrultusunda sonsuza doğru ışın gönderilmektedir. Unity oyun motorunun sağladığı olanak ile gönderilen bu ışının üç boyutlu uzayda çarptığı obje ve objenin konumu hafızada tutulabilmektedir. Raycast mekanizması ile kumanda kolu kullanılarak simülasyon programı içerisinde klavye tuşları ile etkileşime geçilmesi gerçekleştirilmiştir.

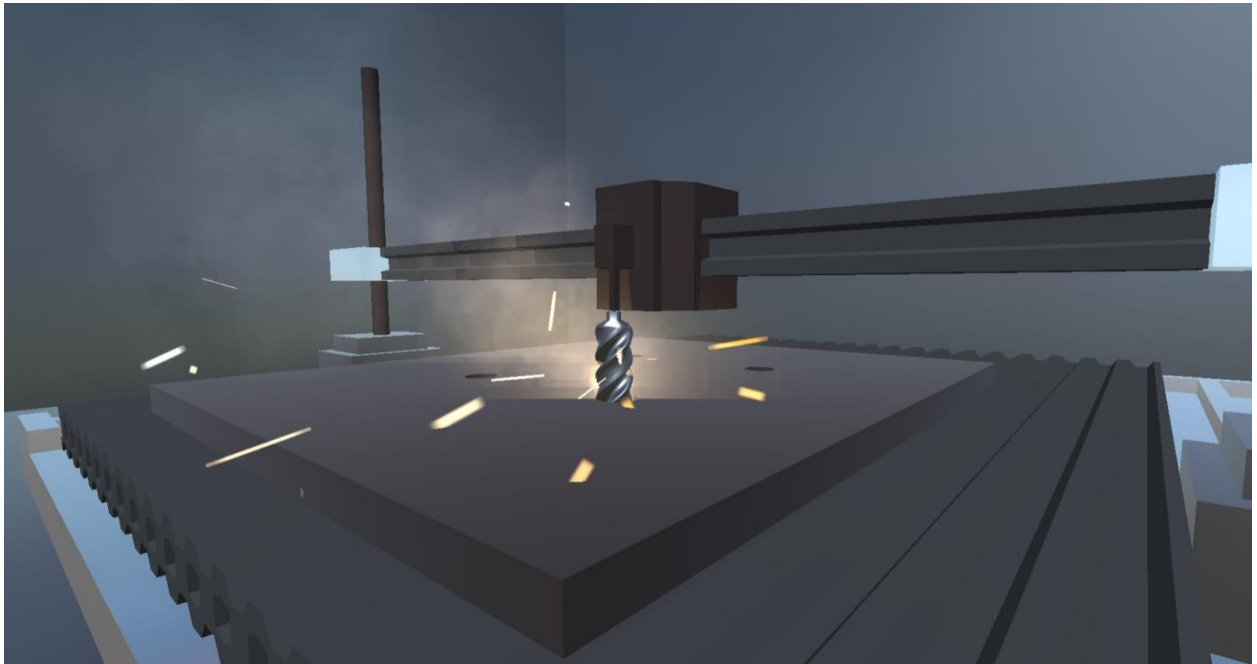
Simülasyon programı içerisindeki kullanıcı hareketleri, sanal gerçeklik başlığından gelen ileri, geri, sağ ve sol yönlerini temsil eden veriler ile sağlanmıştır. Simülasyon programı içerisinde kullanıcı kamerasının yönelimi sanal gerçeklik gözlüğünden gelen Quaternion değişkenleri ile sağlanmıştır. Quaternion tekniği ile hesaplanan yönelim açılarının değerleri Arduino’ya bağlı olan ivme/jiroskop sensöründen belirli zaman aralıkları ile okunan değerlere eşit olacaktır. Unity oyun motorunun sağladığı Quaternion Rotations yöntemi ile simülasyon programında eş zamanlı olarak kullanıcının kamera yönelim açıları kullanıcı girişine göre değişmektedir.

CNC tezgâhın girilen G kodları ile mesafe, hız vb. değişkenlere göre gerçek zamanlı olarak hareket etmesi ve parça işleme işlemlerinin gerçekleştirilmesi, hareket süreci ile sağlanmaktadır. Şekil 5’de kullanıcının sanal gerçeklik başlığını taktığında karşılaştığı sahne görülmektedir. Buna göre kullanıcının kafası hareket ettiğinde sahne içerisinde dolaşabilmektedir. Ayrıca kullanıcı, kumanda kolu yardımı ile 1 numara ile işaretlenmiş olan sınıf tahtası figüründe yer alan örnek teknik çizime bakarak, gerekli G kodunu 2 numara ile işaretlenmiş olan klavyede yazabilmektedir. Aynı zamanda yazdığı kodları 3 numara ile işaretlenmiş olan ekranda görebilmektedir. Ekranın yanındaki beyaz renkli butona tıkladığında ise malzeme, yazılan G koda göre 4 numara ile gösterilen tezgâh alanında işlenmeye başlamaktadır.



*Şekil 5. Geliştirilen sahne alanı*

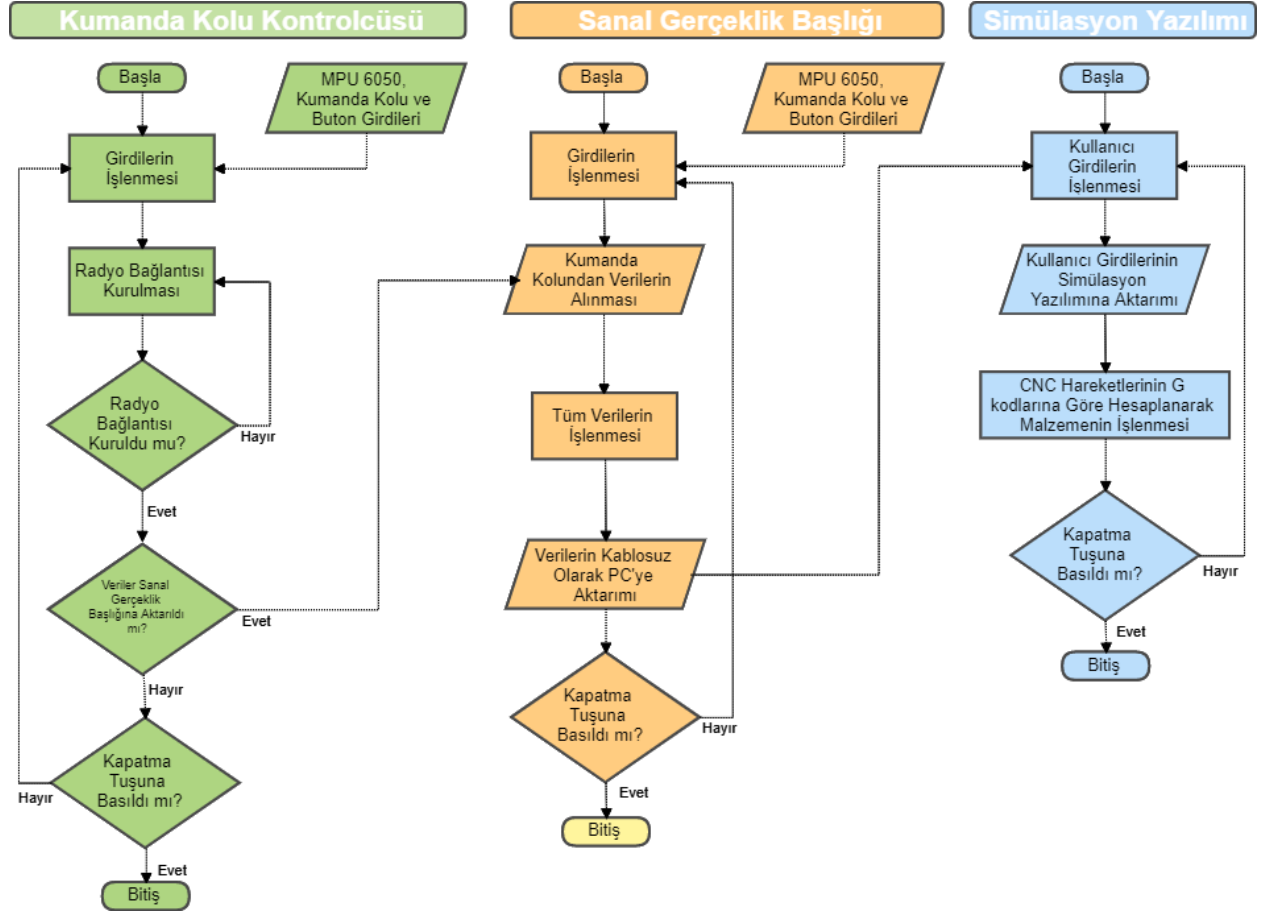
Şekil 6’da ise girilen G koda göre malzeme işlenirken oluşan sahne görüntüsü görülmektedir. Delikler delinirken çıkan ses, duman ve kıvılcım efektleri kullanıcıya tamamen gerçek bir CNC işleme hissiyatı oluşturmaktadır.



*Şekil 6. CNC işlenirken ortaya çıkan görüntü*

Şekil 7’de kumanda kolu ve sanal gerçeklik başlığından oluşan SGD’nin ve simülasyon yazılımının genel çalışma şeklini ifade eden akış şeması görülmektedir. Kumanda kolu kontrolcüsü, sanal gerçeklik başlığı ve simülasyon yazılımı çalıştırıldığında, öncelikle kumanda kolu kontrolcüsü ve sanal gerçeklik başlığında bulunan MPU-6050 ivme/gyro sensöründen jiroskop verileri, kumanda kolu ve buton verileri alınır. Alınan bu veriler Şekil 1’de görülen kumanda kolu kontrolcüsü ve sanal gerçeklik başlığının içerisinde bulunan elektronik devrelerin denetleyicileri tarafından işlenmektedir. Kumanda kolu kontrolcüsü, sanal gerçeklik başlığı ile radyo bağlantısı kurmaktadır. Bağlantı kurulduktan sonra kumanda kolu kontrolcüsü, işlenmiş jiroskop, kumanda kolu ve buton verilerini sanal gerçeklik başlığına radyo bağlantısı aracılığı ile gönderir.

Sanal gerçeklik başlığı, kumanda kolu kontrolcüsünden aldığı işlenmiş jiroskop, kumanda kolu ve buton verilerini kendi denetleyicisinde işlenen jiroskop verileri ile birleştirerek yeniden işlemektedir. Bu veriler simülasyon programında kullanılmak üzere simülasyon yazılımına aktarılır. Veriler simülasyon yazılımına aktarıldıktan sonra simülasyon programının içerisindeki algoritmalar ile sanal gerçeklik donanımından alınan veriler simülasyon programında gösterilir. Kullanıcının simülasyon programının klavye ekranında bulunan tuşlar yardımıyla G kodu yazması sonucunda CNC tezgâhının parça işlemesi canlandırılmaktadır.



Şekil 7. Sistemin genel çalışmasını ifade eden akış şeması

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Gerçekleştirilen sanal gerçeklik uygulaması sadece içerik geliştirilmesine dönük olmayıp aynı zamanda SGD tasarımı da içerdiği için çoğu benzer akademik çalışmadan ayrılmaktadır. Çalışma ile aşağıdaki hedefler başarı ile gerçekleştirilmiştir.

- Açısal değişimlerin elde edilmesi,
- Gerçek zamanlı kablosuz haberleşme sağlanması,
- Unity ile simülasyon yazılımının gerçekleştirilmesi,
- G kodu fonksiyonlarının yazılması,
- Üç boyutlu baskı ve montaj

SGD'nin geliştirilmesi ve Unity ile hazırlanan içerik ile haberleşme ortamının sağlanması arka planda birçok zorluğu da beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada bazı önemli problemler ile karşılaşmış ve bu problemlere farklı çözümler geliştirilmiştir. SGD geliştirilmesinde çözülmesi gereken önemli problemlerden birisi konum değişiminin tespit edilmesidir. Bu problemin çözümünde son dönemlerde Lighthouse adı verilen teknolojinin önemli sanal gerçeklik donanımı üreten firmalar tarafından kullanıldığı



görülmektedir. Lazer tabanlı bu sistem ile sanal gerçeklik başlığının yönü ve pozisyonunun izlenerek kullanıcının sahne içindeki hareketi sağlanmaktadır. Bu yöntemin kullanımının çalışmanın maliyetini önemli derecede artıracak olmasından dolayı konum değişimi için kumanda kolu kullanılması düşünülmüştür. Kullanıcının simülasyon programı ile etkileşim kalitesini arttırmak amacı ile simülasyon programına kumanda kolundan çıkan bir ışın eklenmiştir. Kumanda kolu hareket ettirildiğinde ışının da hareket etmesi ile CNC G kodlarının yazılması daha kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. Sonraki çalışmalarda Lighthouse teknolojisinin kullanılarak SGD geliştirilmesi planlanan hedefler arasındadır.

Geliştirilen SGD'nin önemli özelliklerinden birisi de kablosuz özelliği ile kullanıcıya özgür bir hareket ortamı sağlamasıdır. Ayrıca kablo karmaşasının olmaması da daha fazla talep görme nedenleri arasında sayılabilir. Kablosuz haberleşme kullanılması esnasında veri gönderim boyutunun 32 karakter ile sınırlı olması ise karşılaşılan bir diğer sorun olmuştur. Bu problemten dolayı kumanda kolundaki bazı butonlara ait verilerin sanal gerçeklik başlığına aktarılamaması söz konusu olmuştur. Bu problemin çözümü için öncelikle 32 karakterlik veri bloklarının paketler halinde parça parça gönderimi denenmiştir. Ancak Arduino mikrodenetleyicisi ve Unity oyun motorunun çalışma frekanslarının senkronize olmaması, simülasyon programı içerisinde gecikmelere neden olmuştur. Bu durum kullanıcı deneyimini kabul edilemeyecek düzeyde olumsuz etkilemiştir. Bu yüzden sorunun çözümü için gönderilen verinin hassasiyeti azaltılarak farklı bir yol izlenmiştir.

İvme/jiroskop sensöründen -1.000000 ile +1.000000 arasında dört farklı değer okunmaktadır. Çalışmada açısız değişimlerin hassasiyeti ve kullanıcı etkileşimini olumsuz yönde etkilememesi açısından virgülden sonra dört basamak kullanılmıştır. Ancak noktalar ve eksi işareti göz önünde bulundurulduğunda her bir değişken için maksimum 7 karakterlik bir kablosuz aktarım hafızası kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Virgülden sonra dört basamağın hesaba katıldığı durumda sadece dört farklı değer için 28 karakter kullanılması gerekmektedir. Buna ek olarak buton ve kumanda kolu verileri ile 32 karakter sınırı aşılmaktadır. Bu sınırın aşılmasını önlemek amacıyla dört değişken için virgülden sonra üç basamağın kullanılması ile ilgili deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Quaternion değişkenlerinin hassasiyetinin bir basamak azaltılmasının kullanıcı deneyiminde ortaya çıkardığı olumsuz etkinin kabul edilebilir bir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu değişiklikler sonucunda kumanda kolundan gelebilecek en fazla karakter sayısı 30 olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada geliştirilen sistemin temel amaçlarından birisi teorik olarak öğrenilen G kod çevrimlerinin öğrenciler tarafından her değiştirildiğinde nasıl bir sonuç elde edildiğinin gözlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda CNC programlama için kullanılan temel G kodlarından G81, G82, G83 ve G84 numaralı çevrimlere odaklanılmış ve bu sebeple her çevrimin sağladığı hareket için sistemin yazılımında fonksiyonlar oluşturulmuştur. Öğrenci, kumanda kontrolcüsü ile bu G kodlarından istediğini ilgili parametreleri değiştirerek deneme şansına sahiptir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında farklı çevrimler için Unity temelli fonksiyonlar oluşturularak daha kapsamlı bir sistemin üretilmesi hedeflenmektedir. Ancak bu çalışmanın sınırları bahsedilen G kodları kullanılarak oluşturulmuştur.

Simülasyon programı içerisinde gerçekleşen delik delme veya CNC tezgâhına ait eksenlerin hareketleri sırasında çıkan sesler 3B yazıcının x, y ve z eksenlerinden çıkan seslerin ayrı ayrı kaydedilmiş halidir. İleriki çalışmalarda devir/materyal/derinlik gibi farklı delme işlemleri yapılırken bu işlemlerin orijinal sesleri kullanılabilir.

Bu çalışma özelinde üzerinde tartışılması gereken konulardan birisi ise piyasada ticari olarak bulunan sanal gerçeklik donanımları ve bunların çalışma prensipleridir. Ticari amaçlı olarak kullanılan önemli sanal gerçeklik sistemleri arasında HTC, Oculus, PIMAX 5K VR vb. ürünler sayılabilir. Konum ve yönelim yakalama tekniği olarak HTC, light house tracking adı verilen, boş ve geniş bir odanın köşelerine yerleştirilmiş dört adet kızılötesi sensörünün kullanıldığı bir teknikten faydalanmaktadır. Oculus ise oculus insight adı verilen teknikten faydalanmaktadır. Görüntü işleme temelli bu teknikte konum ve yönelim, beş adet görüntü yakalama kamerası, kızılötesi led ve ivme/gyro sensörlerini kullanarak elde edilen veriler sayesinde belirlenir. Bizim çalışmamızda konum değişimi ölçümü gerçekleştirilmemiştir. Bunun yerine gyro sensörlerinden elde edilen quaternion değişkenlerinin üç eksen için euler açılarına çevrilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu eksiklik sahnede kullanılan sanal klavye ile giderilmeye çalışılmıştır. Bu sayede yukarıda sayılan ticari ürünlerden çok daha düşük maliyetli bir çalışma geliştirilmiştir.

Sanal gerçeklik uygulamalarının günümüzde sadece oyun amaçlı değil eğitim alanında da hızla yerini aldığı görülmektedir. Bizim çalışmamız özelinde CNC tezgâhların yüksek maliyetlerinden dolayı eğitim kurumlarında yaygın olarak bulunmayışı, bu ve benzeri çalışmaları daha da değerli kılmaktadır. Titiz bir çalışma ile üretilen sanal gerçeklik içeriklerinin öğrenme ve öğretme süreçlerini destekleyici ve geliştirici yönde katkı yapacağı düşünülmektedir. Bu konuda sanal gerçeklik uygulamaları kullanarak eğitim alan öğrencilerin görüşleri de bunu doğrular niteliktedir. Birçok anket ve raporda, öğrencilerin sanal gerçeklik uygulamaları ile gördüklerini unutmadıkları, hatta laboratuvar temelli uygulamalardan daha unutulmaz bir ortam oluşturduğu sonucuna varılmıştır [19]. Bu sebepten dolayı ülkemizde de öncelikli olarak yükseköğretim kurumlarında sanal gerçeklik uygulamaları için içerikler hazırlanmasının teşvik edilmesinin değerli olduğu düşünülmektedir.

Yüz yüze eğitimin gerçekleştirilemediği olağanüstü dönemlerde çok büyük yatırımlar yapılarak oluşturulan laboratuvar olanaklarından da istifade edilememektedir. Teorik dersler uzaktan eğitim ile gerçekleştirilebilirken laboratuvar ortamı olmayı gerektiren pratik dersler eksik kalabilmektedir. Sanal laboratuvar uygulamaları ile ilişkili olan sanal gerçeklik uygulamalarının geliştirilmesi, olağanüstü dönemlere hazırlıklı olmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada yer almamakla birlikte bir sonucu üzerinden hazırlanan CNC temalı içeriğin iletimi ve VR donanımına sahip istemcilerin kullanımına olanak sağlanması, gelecek dönemdeki çalışmalarda düşünülebilir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Temel bilimler yoluyla elde ettiği bilgileri teknolojiye dönüştürebilme yeteneğine sahip öğrenciler yetiştirmek, mühendislik eğitiminin en temel hedefleri arasındadır. Bu hedefe ulaşmak için teorik derslerin uygulamalı dersler ile desteklenmesi bir zorunluluktur. Bu bakımdan mühendislik eğitiminde laboratuvarların önemi büyüktür. Alanına bakılmaksızın tüm mühendislik bölümleri şüphesiz sınırsız laboratuvar imkânlarına sahip değildir. Bunun başlıca nedenleri arasında, laboratuvar ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve sonraki dönemlerde gelişen teknoloji ile birlikte teknik ekipmanların sürekli güncellenmesi sayılabilir. Sanal gerçeklik uygulamaları ile desteklenen sanal laboratuvarların bu konudaki eksikliğe bir çözüm olabileceği birçok çalışmada ifade edilmektedir. Son dönemlerde daha çok oyun sektörü ile özdeşleşen sanal gerçeklik uygulamalarının eğitim alanında da giderek popüler hale geldiği ve bu alanda ciddi bilimsel çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Mühendislik eğitimi özelinde de farklı sanal gerçeklik içeriklerinin geliştirildiği görülmektedir. Ancak geçmişe göre düşük olsa da hala sanal gerçeklik donanımlarının fiyatları eğitim alanında yaygın kullanıma erişebilecek düzeyde değildir.

Bu çalışmada makine mühendisliği ve imalat mühendisliği gibi bölümlerde okutulan bilgisayar destekli imalat derslerinde, öğrencilerin CNC tezgâh kullanarak gerçekleştirmek zorunda oldukları uygulamaları, sanal gerçeklik teknolojisi kullanarak tecrübe edinmelerini sağlayan bir sistem önerilmiştir. Bu doğrultuda sanal gerçeklik başlığı ve kumanda kolundan oluşan bir sanal gerçeklik donanımı geliştirilmesinin yanı sıra öğrencilerin CNC G kodları ile denemeler yapabilecekleri bir simülasyon yazılımı gerçekleştirilmiştir. Literatür incelendiğinde, araştırmaların daha çok sanal gerçeklik içeriklerinin hazırlanmasına dönük olduğu görülmektedir. Bizim çalışmamızda diğerlerinden farklı olarak, içerik hazırlanmasının yanı sıra sanal gerçeklik donanımlarının geliştirilerek hem donanım hem de içerik yazılımı içeren komple bir sanal gerçeklik uygulaması önerilmiştir.

Çalışmada açısız değişimlerin elde edilmesi, gerçek zamanlı kablosuz haberleşme sağlanması, Unity ile simülasyon yazılımının gerçekleştirilmesi, G kodu fonksiyonlarının yazılması, sanal gerçeklik başlığı ve kumanda kolu geliştirmesi, üç boyutlu baskı ve montaj gibi işlemler başarı ile uygulanarak tümüyle bir sanal gerçeklik sistemi geliştirilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma 2209-A, 1919B011903497 projesi altında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Bidaybekov, L. B., Bidaybekov, E. I., Sharmukhanbet, S., Kamalova, G. B., & Oshanova, N. T. (2012). The use of virtual measuring devices in teaching modeling of physical processes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 51, 803-806, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.243>.
- [2] Kamińska, D., Sapiński, T., Aitken, N., Della Rocca, A., Barańska, M., & Wietsma, R. (2017). Virtual reality as a new trend in mechanical and electrical engineering education. *Open Physics*, 15(1), 936-941, <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0114>.
- [3] di Lanzo, J. A., Valentine, A., Sohel, F., Yapp, A. Y., Muparadzi, K. C., & Abdelmalek, M. (2020). A review of the uses of virtual reality in engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*, 28(3), 748-763, <https://doi.org/10.1002/cae.22243>.
- [4] Uğuz, S., Oral, O., & Aksoy, B. (2018). STEM Eğitimi için sanal laboratuvar oluşturulması. *Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 69-77.
- [5] İçten, T., & Güngör, B. A. L. (2017). Artırılmış gerçeklik üzerine son gelişmelerin ve uygulamaların incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 111-136.
- [6] Akbulut, A., Catal, C., & Yıldız, B. (2018). On the effectiveness of virtual reality in the education of software engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(4), 918-927, <https://doi.org/10.1002/cae.21935>.
- [7] Ouyang, S. G., Wang, G., Yao, J. Y., Zhu, G. H. W., Liu, Z. Y., & Feng, C. (2018). A Unity3D-based interactive three-dimensional virtual practice platform for chemical engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(1), 91-100, <https://doi.org/10.1002/cae.21863>.
- [8] Tarng, W., Lee, C. Y., Lin, C. M., & Chen, W. H. (2018). Applications of virtual reality in learning the photoelectric effect of liquid crystal display. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(6), 1956-1967, <https://doi.org/10.1002/cae.21957>.
- [9] Hee Lee, J., & Shvetsova, O. A. (2019). The Impact of VR Application on Student's Competency Development: A Comparative Study of Regular and VR Engineering Classes with Similar Competency Scopes. *Sustainability*, 11(8), 2221, <https://doi.org/10.3390/su11082221>.
- [10] Lu, X., Yang, Z., Xu, Z., & Xiong, C. (2020). Scenario simulation of indoor post-earthquake fire rescue based on building information model and virtual reality. *Advances in Engineering Software*, 143, 102792, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102792>.
- [11] Qin, S., Wang, Q., & Chen, X., Qin, S., Wang, Q., & Chen, X. (2020). Application of virtual reality technology in nuclear device design and research. *Fusion Engineering and Design*, 161, 111906, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111906>.
- [12] Wang, R., Lowe, R., Newton, S., & Kocaturk, T. (2020). Task complexity and learning styles in situated virtual learning environments for construction higher education. *Automation in Construction*, 113, 103148, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103148>.
- [13] Alhalabi, W. (2016). Virtual reality systems enhance students' achievements in engineering education. *Behaviour & Information Technology*, 35(11), 919-925, <https://doi.org/10.1080/0144929X.2016.1212931>.
- [14] Labovitz, J., & Hubbard, C. (2020). The Use of Virtual Reality in Podiatric Medical Education. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, 37(2), 409-420, <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2019.12.008>.
- [15] Hagita, K., Kodama, Y., & Takada, M. (2020). Simplified virtual reality training system for radiation shielding and measurement in nuclear engineering. *Progress in Nuclear Energy*, 118, 103127, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103127>.

- [16] Bashabsheh, A. K., Alzoubi, H. H., & Ali, M. Z. (2019). The application of virtual reality technology in architectural pedagogy for building constructions. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 713-723, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.002>.
- [17] O'Connor, M., Deeks, H. M., Dawn, E., Metatla, O., Roudaut, A., Sutton, M., ... & Wonnacott, M. (2018). Sampling molecular conformations and dynamics in a multiuser virtual reality framework. *Science advances*, 4(6), eaat2731, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2731>.
- [18] Li, M., Li, Y., & Guo, H. (2020). Research and application of situated teaching design for NC machining course based on virtual simulation technology. *Computer Applications in Engineering Education*, 28(3), 658-674, <https://doi.org/10.1002/cae.22234>.
- [19] Nadan, T., Alexandrov, V., Jamieson, R., & Watson, K. (2011). Is virtual reality a memorable experience in an educational context?. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 6(1), 53-57.

## Experimental Investigation of the Influences of AlN/Deionized Water Nanofluid on Heat Pipe Performance Parameters

Erdem ÇİFTÇİ\* 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Teknikokullar-Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 23/08/2020

Revision: 28/09/2020

Accepted: 09/10/2020

#### Highlights

- Nanofluid.
- Heat pipe.
- Heat transfer enhancement.

#### Keywords

Aluminum Nitride  
Thermal Resistance  
Efficiency

An aqueous nanofluid solution containing aluminum nitride (AlN) nanoparticles was prepared and tested in a plain heat pipe under different operating conditions. The thermal resistance and efficiency of the heat pipe, both of which are the performance indicators for heat pipes, were comparatively studied, and the alterations in temperature of the heat pipe wall were monitored.

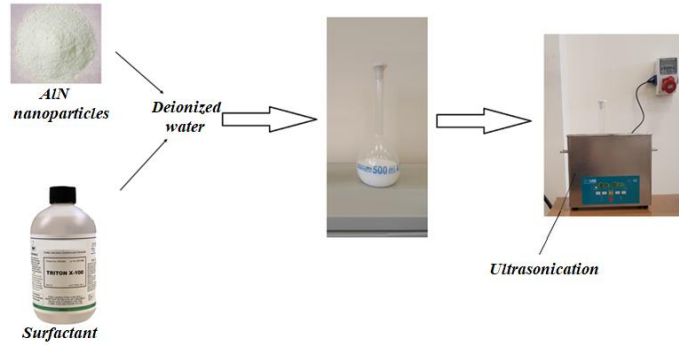


Figure A. The nanofluid preparation process

**Purpose:** The aim of this study is to improve the heat transfer performance of a heat pipe via AlN/deionized water nanofluid. Initially, a nanofluid suspension consisting of AlN nanoparticles (60-70 nm) and Triton X-100 surfactant was prepared at the final volumetric concentration of 1.3%, and then tested in a heat pipe.

**Theory and Methods:** The circular heat pipe used in the experiments was made of copper material with a wall thickness of 1 mm, an inner diameter of 13 mm and a length of 1000 mm. In order to observe the effects of nanoparticles, experiments were initially carried out for deionized water and then for nanofluid solution. In the experiments, the thermal resistance and efficiency of the heat pipe, both of which are the performance indicators for heat pipes, were comparatively studied, and the alterations in temperature of the heat pipe wall were monitored. The experiments were run under 150 W, 300 W, and 400 W heating power, and 3 g/s, 6 g/s, and 9 g/s cooling water mass flow rate conditions.

**Results:** With the use of nanofluid containing aluminum nitride nanoparticles instead of deionized water as the working fluid, the maximum enhancements in thermal resistance and efficiency were recorded as 10.9% and 45.6%, respectively.

**Conclusion:** Heat pipe wall temperatures and boiling point were reduced significantly by using nanofluid as a working fluid. When AlN nanofluid was used instead of deionized water, a decrease of up to 10.9% was achieved in the thermal resistance of the heat pipe. A maximum increase of 45.6% was obtained in the efficiency of the heat pipe with the usage of nanofluid. The benefits of using AlN nanofluid in the heat pipe were also been demonstrated.

GU J Sci, Part C, 8(4): 858-871 (2020)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## AIN/Saf Su Nanoakışkanının Isı Borusu Performans Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması

Erdem ÇİFTÇİ\*

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar-Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Sağlamış oldukları birçok fayda nedeniyle ısı sistemlerde geleneksel iş akışkanları yerine nanoakışkan çözeltilerinin kullanımı son yılların en popüler konularından biri olmuştur. Bu deneysel çalışmada alüminyum nitrid (AIN) nanoparçacıkları içeren sulu nanoakışkan çözeltisi hazırlanmış ve farklı çalışma koşulları altında çalışan düz bir ısı borusunda test edilmiştir. Deneylerde kullanılan dairesel kesitli ısı borusu et kalınlığı 1 mm, iç çapı 13 mm ve uzunluğu 1000 mm olacak şekilde bakır malzemeden imal edilmiştir. Nanoparçacıkların sağlanmış olduğu etkileri gözlemleyebilmek amacıyla deneyler önce saf su ardından nanoakışkan çözeltisi için gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ısı boruları için performans göstergesi olan ısı borusunun ısı direnci ve verimi karşılaştırmalı olarak ele alınmış, ısı borusu duvar sıcaklığındaki değişimler incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu veriminin iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Saf su yerine alüminyum nitrid nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın iş akışkanı olarak kullanımıyla ısı direnci ve verimdeki en yüksek artışlar sırasıyla %10,9 ve %45,6 olmuştur.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 23/08/2020  
Düzeltilme: 28/09/2020  
Kabul: 09/10/2020

### Anahtar Kelimeler

Alüminyum Nitrid  
Isı Direnci  
Verim

### Keywords

Aluminum Nitride  
Thermal Resistance  
Efficiency

## Experimental Investigation of the Influences of AIN/Deionized Water Nanofluid on Heat Pipe Performance Parameters

### Abstract

Utilization of nanofluidic solutions instead of conventional working fluids in thermal systems has become one of the most popular topics in recent years due to the many benefits they provide. In this experimental study, an aqueous nanofluid solution containing aluminum nitride (AIN) nanoparticles was prepared and tested in a plain heat pipe under different operating conditions. The circular heat pipe used in the experiments was made of copper material with a wall thickness of 1 mm, an inner diameter of 13 mm and a length of 1000 mm. In order to observe the effects of nanoparticles, experiments were initially carried out for deionized water and then for nanofluid solution. In the experiments, the thermal resistance and efficiency of the heat pipe, both of which are the performance indicators for heat pipes, were comparatively studied, and the alterations in temperature of the heat pipe wall were monitored. The data obtained from the experiments revealed that the heat pipe efficiency can be improved by employing nanofluid instead of deionized water. With the use of nanofluid containing aluminum nitride nanoparticles instead of deionized water as the working fluid, the maximum enhancements in thermal resistance and efficiency were recorded as 10.9% and 45.6%, respectively.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir sıcaklık farkının var olmasıyla vuku bulan, ısı enerjisinin bir ortamdan başka bir ortama aktarılması işlemi, büyük miktarda enerji dönüşümünün söz konusu olduğu süreçlerden biridir. Genellikle ısı değiştiricisi olarak adlandırılan cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilen ısı transferi, enerji verimliliğinin önem kazandığı günümüz uygulamalarında büyük ölçüde yarar sağlanabilecek bir konumdur. Bu amaçla bilinen performans artırma yöntemlerinin daha da geliştirilmesi (örneğin mevcut yalıtım malzemelerinin ısı ve/veya mekanik işlemlerle belirli özelliklerinin iyileştirilmesi) bilim insanlarının odak noktası haline gelmiştir. Bu eğilimin bir benzeri de ısı transferi uygulamalarında geleneksel iş akışkanı yerine içerisinde nano boyutta parçacıklar içeren akışkanların-bu tür akışkanlara nanoakışkan denilmektedir- kullanımı şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Nanoakışkanların kullanıldıkları sistemin ısı transfer performansını

arttırması, esasen temel iş akışkanının termofiziksel özelliklerinin (özgül ısı, yoğunluk, ısıl iletkenlik ve viskozite) iyileştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Sözen vd. tarafından yapılan çalışmalar neticesinde nanoakışkanların ısı transferini iyileştirmesinin başlıca sebepleri şu şekilde açıklanmıştır [1]:

- Akışkan içerisine katılan nanoparçacıkların kullanım esnasında birbirleriyle olan etkileşimleri/çarpışmaları karışım içindeki türbülansın şiddetini arttırmaktadır.
- Nanoparçacıkların akışkan içerisinde oluşturduğu ekstra alanlar etkin ısı transfer alanının artmasını ve buna bağlı olarak da ısı transferinin iyileşmesini sağlamaktadır.
- Katıların sıvılara kıyasla ısı iletim katsayılarının daha büyük olmasının bir sonucu olarak, temel akışkan içerisine katılan, büyük ölçüde yüksek ısıl iletkenliğe sahip katı nanoparçacıklar akışkanın ısı iletim katsayısını arttırır.
- Akışkanın özgül ısısı, içerisine nanoparçacıkların katılmasıyla artar.

Nanoakışkanlar genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin nano boyuta indirgenmesi ve sıvı bir akışkanla belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilirler. Bilindiği üzere metaller yüksek ısıl iletkenliğe sahiptirler ve bu nedenle nanoakışkan hazırlamada en çok tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Benzer şekilde, metal oksit bileşikleri (alümina, titanyum dioksit vb.) de nanoakışkan hazırlamak için uygun malzemelerdendir. Temel akışkan içerisine katılan nano boyuttaki parçacıklar akışkanın ısı iletim katsayısını, özgül ısısını, yoğunluğunu ve viskozitesini arttırmakta, diğer bir deyişle termofiziksel özelliklerini iyileştirmekte, bu da nanoakışkanın kullanıldığı sistemin performansında artış olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna ek olarak, nanoparçacıkların şekil, büyüklük gibi fiziksel özellikleri, hacimsel/kütlesel derişim oranı, temel akışkan türü (su, etilen glikol, vb.) ve çalışma sıcaklığı da nanoakışkan çözeltisinin termofiziksel özellikleri üzerinde etkiye sahiptir.

Nanoakışkan hazırlanması sürecinde dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar vardır. Hazırlanan çözeltinin kimyasal olarak kararlı bir yapıda olması, nanoparçacıkların temel akışkan içerisinde dağılımının homojen olması, katı parçacıkların birleşerek daha büyük parçacıklar oluşturmaması ve çökelmenin önlenmesi, eğer kullanılacaksa hem yüzey aktif maddenin hem de nanoparçacıkların temel akışkanın kimyasal yapısını bozmaması gerekmektedir [2].

Isı boruları bilinen en basit ısı değıştiricilerindendir. Hem imalatının kolay olması hem de istenilen boyutlarda üretilebilmesi bu cihazların çok geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. Isı boruları içerisine konulan akışkanın faz değışiminden faydalanarak ısının ortamlar arasında transferini sağlarlar. İçerisindeki akışkanın hareketinde yer çekiminden yararlanma durumuna göre düz bir yapıda imal edilebileceği gibi-bu tip ısı borularına termosifon tipi ısı borusu denilmektedir-, yer çekiminin etkin olmadığı durumlar için fitilli ya da ağ yapılı olacak şekilde de üretilebilirler. Nanoakışkanların ısı borusunda kullanımıyla ilgili birçok araştırmacı tarafından hem deneysel hem de teorik çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar nanoakışkan kullanımıyla ısı borularında performans artışı elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, Chen vd. bakır malzemenin imal ettikleri termosifon tipi bir ısı borusunun performansını belirlemek amacıyla yaptıkları deneysel çalışmada su, etanol ve u ile CuO nanoparçacıkları içeren nanoakışkanları iş akışkanı olarak kullanmışlar ve ısı borusunun performans parametrelerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda nanoakışkan kullanımının sistemin performansını arttırdığını gözlemlemişlerdir [3]. Sadeghinezhad vd. iç bölümü sinterlenmiş ısı borusunun performans parametrelerini hem saf su hem de nanoakışkan kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Grafen-su nanoakışkanı ve saf su kullanarak yaptıkları deneylerde, eğim açısının etkisini belirlemek amacıyla, yatayla 0° ve 60° açı yapacak şekilde tuttıkları ısı borusunda 4 farklı ısıtıcı gücü ve 4 farklı derişim oranı (ağırlıkça %0,025, %0,05, %0,075 ve %0,01) için performans parametrelerini ve bunların değışimini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda grafen-su nanoakışkanı kullanımıyla saf su ile yapılan deneylere kıyasla ısı borusunun direncinde %48,4'e varan oranlarda bir azalma elde ettiklerini bildirmişlerdir. Benzer şekilde ısı iletim katsayısındaki artış oranının ise %37,2 olduğunu ve bu sonuca 60° eğim açısı ile 60 W ısıtıcı gücü koşullarında elde ettiklerini ifade etmişlerdir [4]. Gürü vd. bentonit nanoparçacıkları içeren 3 farklı derişimde (ağırlıkça %0,5, %2 ve %4) sulu nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlar ve bunları termosifon tipi bir ısı borusunda kullanarak, farklı ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debisi koşulları altında ısı borusu performans parametrelerini incelemişlerdir. Hem saf su hem de ağırlıkça %0,5 oranında yüzey aktif madde kullanarak hazırladıkları nanoakışkan çözeltileri ile yaptıkları deneylerde ısı borusu verimini, evaporatör

ve kondenser bölgesi duvar sıcaklıklarını ve ısı borusunun direncindeki değişimleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu performansının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Isıl verimde en büyük artış oranının %37 olduğunu ve bu değeri 200 W ısıtıcı gücü ile 5 g/s soğutma suyu debisinde yapılan deneylerden elde ettiklerini bildirmişlerdir [5]. Sarafraz vd. biyonanoakışkan hazırlamışlar ve yaptıkları deneylerle yeni nesil bu akışkanın düz bir ısı borusundaki (termosifon) performansını araştırmışlardır. Deneylerinde kullanmış oldukları bakır malzemeden yapılmış ısı borusu 10,7 mm iç çapa, 12 mm dış çapa ve 280 mm uzunluğa sahip olup, evaporatör bölgesinden sabit ısı akışı uygulayarak kondenser bölgesinde yer alan soğutma ceketine olan ısı transferini incelemişlerdir. Akışkan dolun oranının, eğim açısının ve derişim oranının termosifon performans parametrelerine olan etkilerini belirlemişlerdir. Nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu direncinin azaltılabileceğini ve buna bağlı olarak da ısı performansın artırılabilceğini ortaya koymuşlardır [6]. Qu vd. titreşimli bir ısı borusunda sulu alümina nanoakışkan kullanımının deneysel olarak incelendiği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları bakır malzemeden imal edilmiş, iç çapı 2 mm ve dış çapı 3 mm olan ısı borusunda hem saf su hem de nanoakışkan için deneyler yaparak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri verilere dayanarak nanoakışkanların ısı borusunda iş akışkanı olarak kullanılabilceğini gösteren araştırmacılar, ısıl dirençte %32'ye varan oranlarda azalma gözlemlediklerini belirtmişlerdir [7]. Xu vd. farklı derişimlerde hazırlamış oldukları etanol-su (hacimce %20, %30, %40, %50 ve %75), ve grafen-su nanoakışkanları (0,1 mg/ml, 0,3 mg/ml, 0,5 mg/ml, 0,75 mg/ml ve 1,0 mg/ml) ile titreşimli ısı borusunda deneyler yapmışlar ve her bir akışkan türünün ısı borusu performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Yüzey aktif madde türünün de etkilerini belirledikleri bu çalışmada etanol-su karışımı için ısıl performanstaki en iyi sonucun hacimce %30 oranındaki karışım oranında elde edildiğini, grafen nanoakışkanının ise ısıl direnci %25'e varan oranlarda düşürdüğünü bildirmişlerdir. Isıl performans açısından en uygun yüzey aktif maddenin Triton X-100 olduğunu gözlemlenmişlerdir [8]. Bu çalışmalara ek olarak titanyum dioksit [9, 10], boksit [11], magnezyum oksit [12, 13] ve çinko oksit [14] gibi materyallerle de nanoakışkan çözeltileri hazırlanmış ve bunların ısı borularında kullanımıyla performansta önemli artışlar elde edildiği görülmektedir.

Bu çalışmada alüminyum nitrür (AlN) nanoakışkanının hazırlanması ve bu akışkanın ısı borusunda iş akışkanı olarak kullanımın farklı çalışma koşulları altında ısıl performansta sağlayacağı etkiler deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla bir ısı borusu test düzeneği kurularak hem saf su hem de nanoakışkan çözeltisi için 3 farklı ısıtıcı gücü (150 W, 300 W ve 450 W) ve 3 farklı derişim oranında deneyler yapılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Alüminyum nitrür nanoakışkanının daha önceden hazırlanmamış ve farklı çalışma koşulları altında ısı borusundaki kullanımının etkilerinin incelenmemiş olması bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL & METHOD)

### 2.1. Nanoakışkanın Hazırlanması (Preparation of Nanofluid)

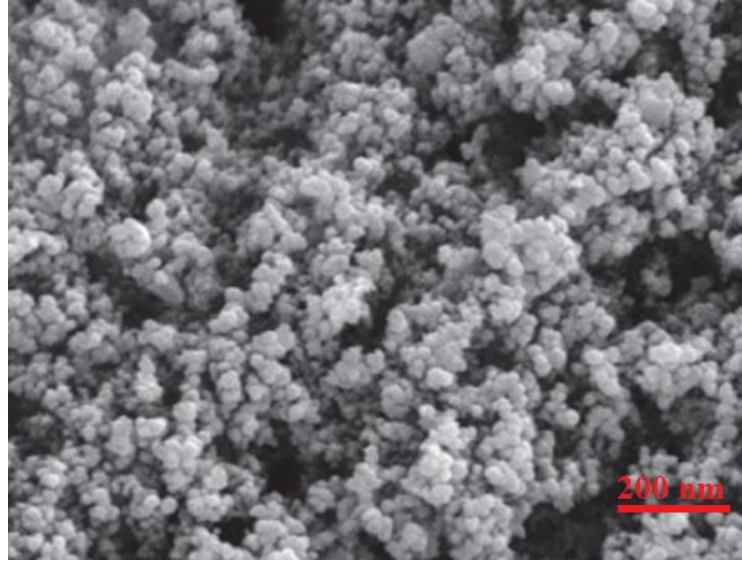
Çalışmada kullanılan AlN nanoparçacıkları Nanografi Nanoteknoloji adlı firmadan temin edilmiştir. Firma tarafından sunulan analiz sonuçlarına göre malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan AlN nanoparçacıkları ortalama 60-70 nm boyutlarında olup, malzemeye ait SEM görüntüsü ise Şekil 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** AlN nanoparçacıklarının kimyasal bileşimi

Bileşen	N	O	C	Fe	Si
%	33,0	0,5	0,04	0,01	0,045

AlN yüksek ısıl iletkenliğe (320 W/mK) sahip bir malzeme olmasına karşın, düşük ısıl genişlemenin yanı sıra korozyon ve aşınmaya karşı da oldukça dayanıklı bir malzemedir. Yoğunluğu 3,26 g/cm<sup>3</sup>tür ve erime noktası yüksektir. Özellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması alüminyum nitrürün nanoakışkan hazırlamak amacıyla kullanılabilceğini akla getirmiştir.

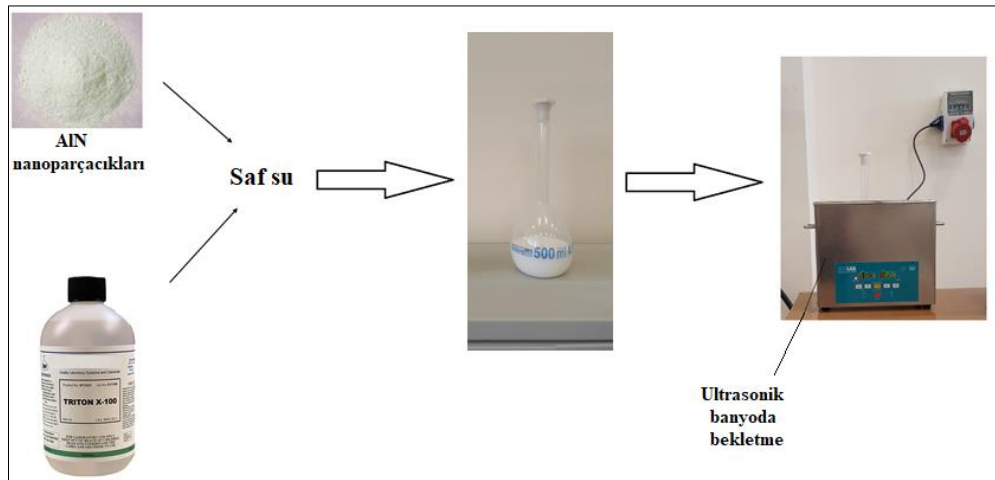




**Şekil 1.** AlN nanoparçacıklarına ait SEM görüntüsü.

Nanoakışkan süspansiyonlarının hazırlanmasında nanoparçacıkların temel akışkan içerisinde üretildiği tek aşamalı yöntem (single-step method) ile malzeme boyutunun bir dış ortamda nano boyuta düşürülerek bu parçacıkların temel akışkan içerisine eklenmesi ilkesine dayanan iki aşamalı yöntem (two-step method) olarak ifade edilen yöntemlerden birisi kullanılır. İki aşamalı yöntemde nanoparçacıkların temel akışkan içerisinde homojen bir şekilde dağılması kontrol edilebildiğinden bu yöntemle elde edilen nanoakışkan çözeltilerinin daha kararlı ve homojen olduklarını söylemek mümkündür [2]. Bu sebeple nanoakışkan hazırlanmasında iki aşamalı yöntem tercih edilmiştir. Nanoakışkan hazırlamak amacıyla temel akışkan olarak saf su kullanılmış ve içerisine ağırlıkça %1,3 oranında derişime sahip olacak şekilde AlN nanoparçacıkları eklenmiştir. Hem nanoparçacıkların çökeltme süresini uzatmak hem de kararlı yapıda bir nanoakışkan süspansiyonu hazırlamak amacıyla karışım içerisine ağırlıkça %0,2 oranında yüzey aktif madde (Triton X-100) eklenmiştir. Hazırlanan nanoakışkan süspansiyonun homojen olmasını sağlamak amacıyla yaklaşık 3 saat ultrasonik banyoda bekletilmiştir (Şekil 2).

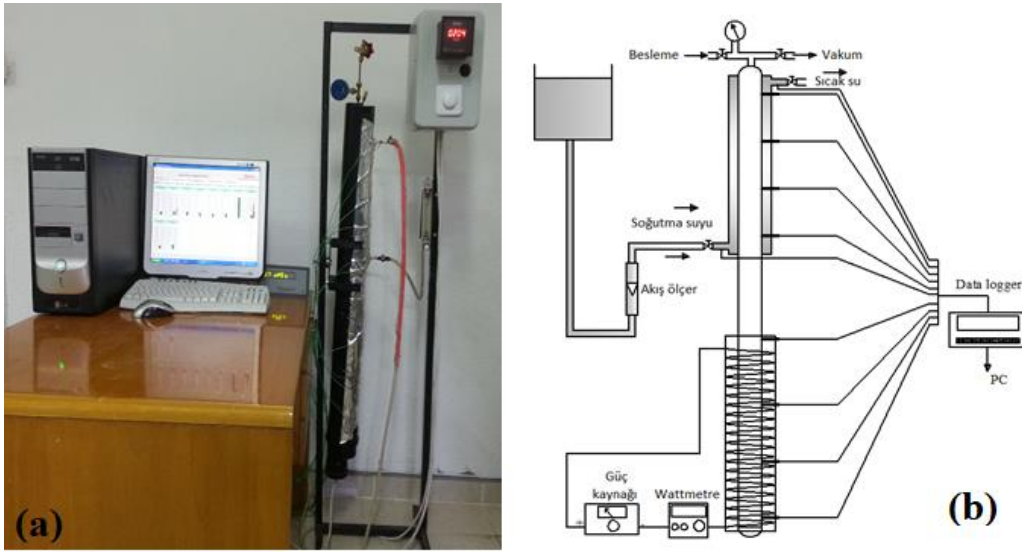
Nanoakışkanın hazırlanmasında kullanılan Triton X-100 yüzey aktif maddesi iyonik olmayan bir yüzey aktif maddedir. Bu tür yüzey aktif maddelerin içindeki iyonlar, sıvı akışkan içerisinde dağılmamaktadır. Yüzey aktif maddenin çözünürlüğünün anyonik, katyonik ve amfoterik tip yüzey aktif maddeler için sıcaklıktaki herhangi bir artışa paralel olarak artmasına karşılık, iyonik olmayan bir yüzey aktif madde için çözünürlük sıcaklık değişse dahi sabit kalmaktadır. Bu nedenle yüzey aktif madde olarak Triton X-100 kullanılmıştır.



**Şekil 2.** AlN/saf su nanoakışkanının hazırlanması ve ultrasonik banyoda bekletilmesi süreçleri.

## 2.2. Deney Düzenine Ait Bilgiler (Details of the Test Rig)

Deneylerde 1 mm et kalınlığına sahip bakır malzemeden yapılmış, uzunluğu 1 m ve iç çapı 13 mm olan düz bir boru kullanılmıştır (Şekil 3). Kullanılan ısı borusu alttan ve üstten 400 mm'lik kısımları sırasıyla evaporatör ve kondenser bölgelerini, ortada kalan 200 mm'lik bölümü ise adyabatik bölgeyi oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Evaporatör bölgesine uygulanan ısı girdisi ortalama 1,5 kW gücünde bir ısıtıcı vasıtasıyla sağlanmış ve güç girdisi bir wattmetre (Fluke-43b analyzer) üzerinden gözlemlenmiştir. Kondenser bölümüne taşınan ısı miktarını belirlemek amacıyla bu bölüm, içerisinde su dolaşan bir soğutma ceketini ile sarılmıştır. Soğutma suyunun debisi bir debimetre aracılığıyla ayarlanmış ve ölçülmüştür. Isı borusunun tamamı ısı kayıplarını en düşük seviyede tutmak amacıyla yalıtılmıştır. Yalıtım işlemi için 0,040 W/mK ısıl iletkenliğe sahip cam yünü malzeme kullanılmıştır. Teorik analizler için sıcaklık ölçümleri yapılmış, ölçümler için dörder adet evaporatör ve kondenser bölgelerine, birer adet soğutma suyu giriş ve çıkış bölgelerine yerleştirilmiş toplam 10 adet K tipi termokupl kullanılmıştır (Şekil 4). Bir datalogger aracılığıyla tüm sıcaklık ölçüm verileri anlık olarak izlenmiş ve kayıt altında tutulmuştur. Isı borusu içerisine şarj edilen akışkan miktarı akışkanın türüne bakılmaksızın toplam ısı borusu hacminin üçte birine (yaklaşık 44,2 ml) tekabül edecek şekilde ayarlanmıştır. Akışkan şarj edilmeden önce ısı borusu bir vakum pompası aracılığıyla vakumlanarak deneylerin vakum basıncında yapılması sağlanmıştır. Evaporatör bölgesine 150 W, 300 W ve 450 W güçlerinde ısıl güç girdisi sağlanarak ısı borusu içindeki akışkanın buharlaşması sağlanmış, buharlaşarak yükselen akışkanın sahip olduğu ısıyı çekmek amacıyla da kondenser bölgesindeki su ceketini içerisinde 3 g/s, 6 g/s ve 9 g/s kütleli debilerde soğutma suyu dolaştırılmıştır. Tekrarlanabilirlik ve deneysel sonuçların doğruluğu açısından her bir akışkan türü için 3 defa deney yapılmış ve bunların ortalaması teorik analizlerde kullanılmıştır.

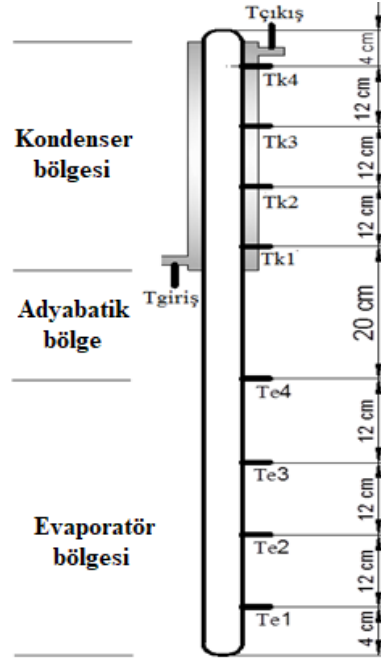


Şekil 3. Deney düzenine (a) genel görünümü ve (b) şematik diyagramı.

## 2.3. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Deneyel bir çalışmada kullanılan ölçüm aletlerinin kalibrasyonu ve bağlantı noktaları, veri okuma ve deney koşulları (ortam sıcaklığı, nemi vb.) deney sonuçlarını etkileyen, diğer bir deyişle hata ve belirsizlik oluşuma neden olan parametrelerdir. Deneyel standartları yakalayabilmek için belirsizlik analizi yapılarak elde edilen sonuçların hassasiyetinin ortaya konulması gereklidir. Bu amaçla yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin belirsizliği Holman tarafından önerilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır [15]. Kullanılan termokuplların hassasiyeti ( $w_{termokupl}$ ), termokupl bağlantıları ( $w_{termokupl, bağlantı}$ ) ve okuma hatalarından ( $w_{okuma, sıcaklık}$ ) kaynaklanan sıcaklık ölçümündeki toplam belirsizlik ( $W_S$ ):

$$W_S = \left[ (w_{termokupl})^2 + (w_{termokupl, bağlantı})^2 + (w_{okuma, sıcaklık})^2 \right]^{1/2} \quad 1$$



Şekil 4. Termokuplların ısı borusu üzerindeki yerleşimi.

$$W_S = [(0,5)^2 + (1)^2 + (0,5)^2]^{1/2} = 1,224 \quad 2$$

Kondenser bölgesindeki ısıyı çekmek için tasarlanan soğutma ceketinde dolaşan suyun kütleli debisinin ölçümündeki toplam belirsizlik ( $W_D$ ), debimetrenin hassasiyeti ( $w_{debimetre}$ ) ve okuma hatalarından ( $w_{okuma, debi}$ ) kaynaklanmaktadır:

$$W_D = [(w_{debimetre})^2 + (w_{okuma, debi})^2]^{1/2} \quad 3$$

$$W_D = [(0,01)^2 + (0,01)^2]^{1/2} = 0,0141 \quad 4$$

Benzer şekilde, evaporatör bölgesinden uygulanan ve wattmetre aracılığıyla kontrol edilen elektrik gücünün ölçümündeki toplam belirsizlik ( $W_G$ ), wattmetrenin hassasiyeti ( $w_{wattmetre}$ ) ve okuma hatalarından ( $w_{okuma, wattmetre}$ ) kaynaklanmaktadır. Bu durumda elektriksel güç ölçümündeki belirsizlik:

$$W_G = [(w_{wattmetre})^2 + (w_{okuma, wattmetre})^2]^{1/2} \quad 5$$

$$W_G = [(0,9)^2 + (1)^2]^{1/2} = 1,3453 \quad 6$$

Yapılan işlemler sonucunda her bir ölçüm için hesaplanan belirsizlik miktarı Tablo'2 de verilmiştir.

Tablo 2. Ölçüm aletlerinin hesaplanan belirsizlikleri

Ölçüm Aleti / Ölçüm Türü	Teknik Özellikler	Hassasiyet	Hesaplanan Belirsizlik
Termokupl & Data logger / Sıcaklık ölçümü	K tipi; ölçüm aralığı - 200°C - +1200°C	± % 0,5 °C	± % 1,224 °C
Debimetre / Debi ölçümü	Ölçüm aralığı 0-12 g/s	± 0,01 g/s	± 0,0141 g/s
Wattmetre / Elektriksel güç ölçümü	Fluke-43b analizör	± 1 W	± 1,3453 W

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

Kondenser bölgesindeki soğutma ceketinde dolaşan suya olan ısı transferi Eş. (7) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada  $\dot{m}$  soğutma suyunun debisini (3 g/s, 6 g/s veya 9 g/s),  $c_p$  akışkanın sabit basınçtaki

özgül ısısını,  $T_{çıkış,su}$  soğutma suyu çıkış sıcaklığını ve  $T_{giriş,su}$  ise soğutma suyu giriş sıcaklığını temsil etmektedir.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{çıkış,su} - T_{giriş,su}) \quad 7$$

Hazırlanan nanoakışkan çözeltisinin özgül ısı değeri Maxwell bağıntısı olarak bilinen ve yaygın olarak kullanılan aşağıdaki bağıntı aracılığıyla yaklaşık olarak hesaplanmıştır [16].

$$c_{p,na} = (1 - \phi)c_{p,ta} + \phi c_{p,np} \quad 8$$

Eş. (8)'de yer alan  $c_{p,na}$  nanoakışkanın özgül ısı değerini,  $\phi$  derişim oranını,  $c_{p,ta}$  temel akışkanın özgül ısı değerini ve  $c_{p,np}$  ise nanoparçacığın özgül ısı değerini göstermektedir.

Isı borusunun verimi kondenser bölgesinden atılan ısı miktarının evaporatör bölgesine sağlanan ısı miktarına oranlanmasıyla hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_e} \quad 9$$

Diğer bir deyişle, Eş. (9)'daki  $\dot{Q}_e$ , buharlaşma bölgesinden verilen ısıtıcı gücünü temsil etmektedir.

Isı borusunun ısıl direnci, evaporatör bölgesi ortalama sıcaklığı ile kondenser bölgesi ortalama sıcaklığı arasındaki farkın sağlanan ısıtıcı gücüne oranıdır (Eş. (10)).

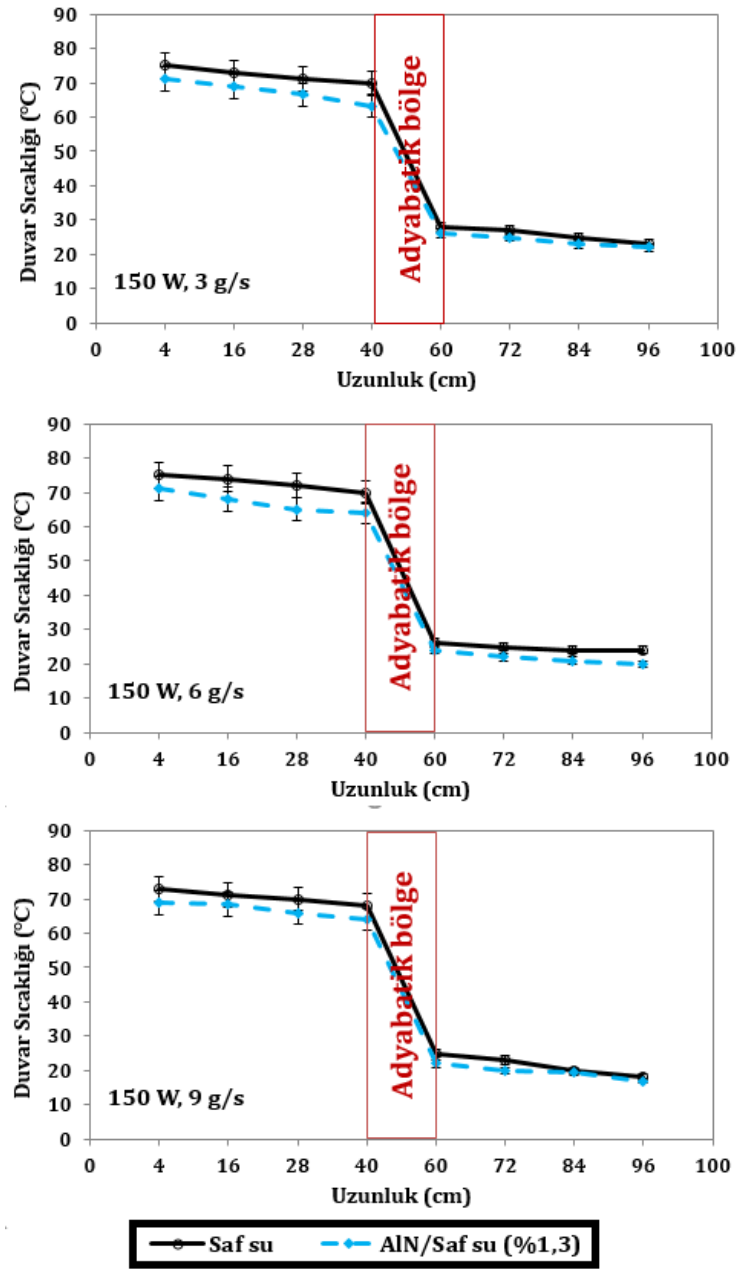
$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{giriş}} \quad 10$$

Eş. (10)'da yer alan ortalama sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ), Eş. (11)'de sunulan bağıntı ile hesaplanmıştır.

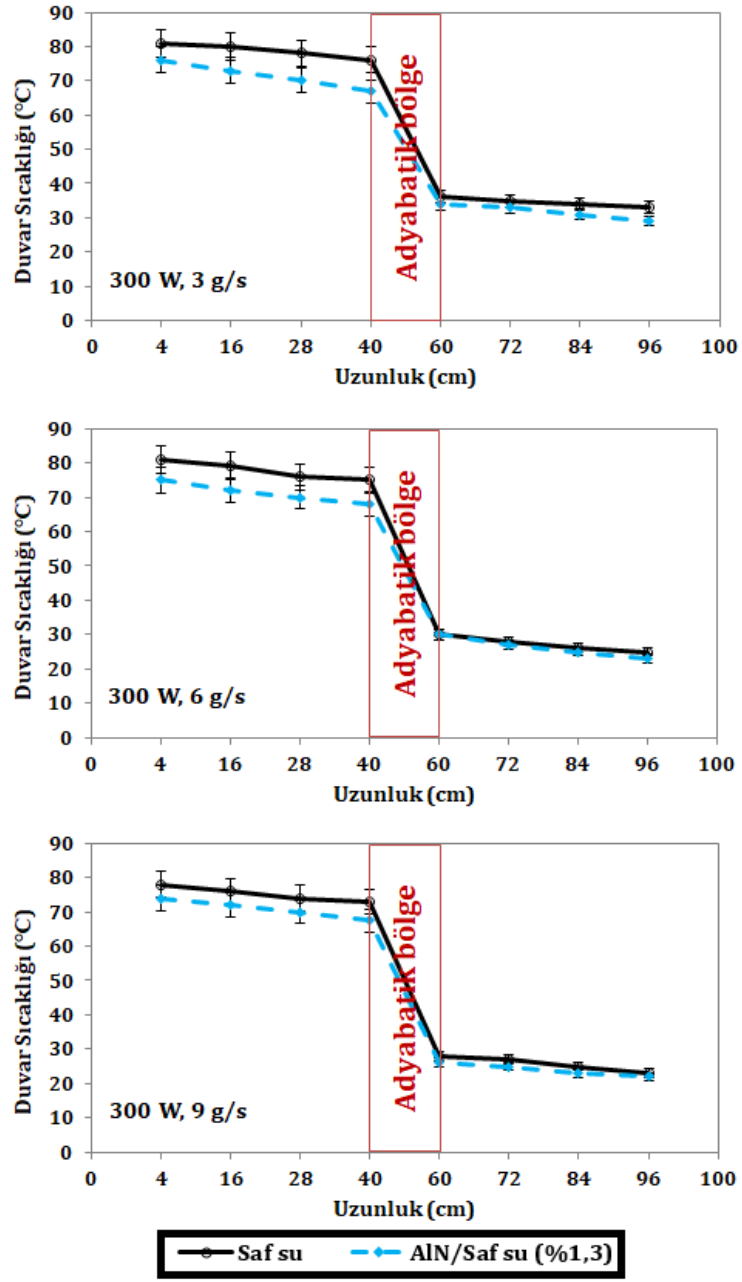
$$\Delta T = \left( \frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3} + T_{e4}}{4} \right) - \left( \frac{T_{k1} + T_{k2} + T_{k3} + T_{k4}}{4} \right) \quad 11$$

Isı borusunun performans parametrelerindeki değişimleri incelemek amacıyla deneyler önce saf su ardından nanoakışkan çözeltisi ile sırasıyla 150 W, 300 W ve 450 W ısıtıcı güçleri ve 3 g/s, 6 g/s ve 9 g/s soğutma suyu debisi koşullarında yapılmıştır. Evaporatör bölgesinden uygulanan 150 W ısıl güce karşılık ısı borusu duvarlarındaki sıcaklık değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu duvar sıcaklığında azalmalar görülmüştür. Ayrıca bu grafik nanoakışkanın daha düşük sıcaklıkta kaynamaya başladığını göstermektedir. Düşük ve yüksek soğutma suyu debilerinde kondenser bölgesinde oluşan sıcaklık farkının ortalama debi değerinde (6 g/s) oluşan farka göre daha az olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde 300 W ve 450 W ısıl güçlerde saf su ve AlN nanoakışkanı için elde edilen duvar sıcaklıkları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

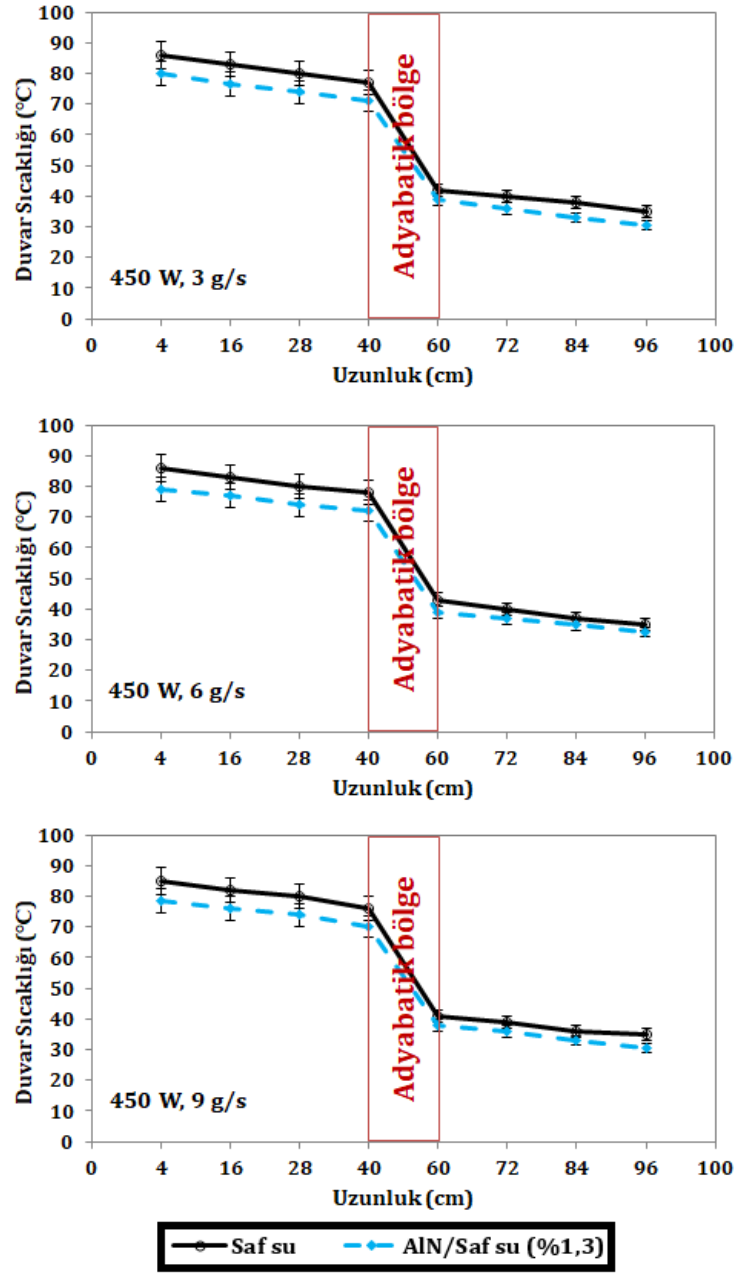
300 W ve 450 W ısıtıcı güçleri için elde edilen duvar sıcaklık dağılımları incelendiğinde iş akışkanı olarak saf su yerine AlN nanoakışkanı kullanılması sonucu ısı borusu duvar sıcaklıklarında düşüş sağlandığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkan içerisindeki katı parçacıkların akışkan içerisindeki ısı transfer alanlarını artırması sonucu ısı transfer hızında da büyük ölçüde iyileşme olduğu saptanmıştır. 450 W ısıtıcı gücü ve 6 g/s soğutma suyu debisi çalışma koşullarında saf su ve AlN nanoakışkanı için kaynama sıcaklıklarının 79°C ve 86°C olarak ölçülmesi bu hususa verilebilecek en belirgin örneklerdir.



Şekil 5. 150 W ısıtıcı gücünde elde edilen duvar sıcaklıkları.

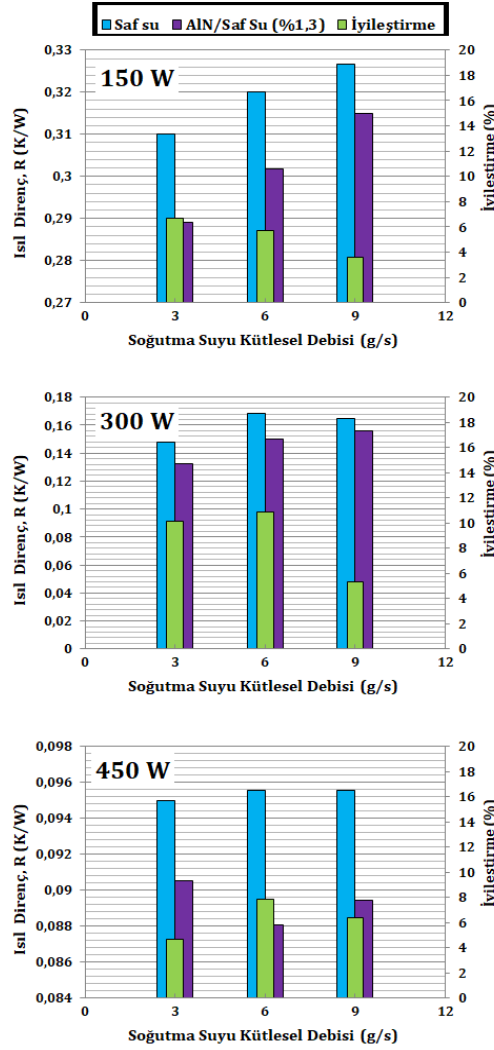


Şekil 6. 300 W ısıtıcı gücünde elde edilen duvar sıcaklıkları.



Şekil 7. 450 W ısıtıcı gücünde elde edilen duvar sıcaklıkları.

Isı boruları için ısı direnç kavramı, bu cihazların kullanımını sınırlandıran bir parametre olduğundan büyük öneme sahiptir. Isı borusunun direnci ne kadar küçük olursa sistemin evaporatör bölgesinden çekeceği ve kondenser bölgesinden atacağı ısı miktarı o derece büyük olacaktır. Bu nedenle ısı borularının yüksek ısı iletkenliğe ve düşük ısı dirence sahip olması arzu edilmektedir. Saf su ve nanoakışkan kullanılarak yapılan deneyler sonucunda ısı borusunun ısı direncine ait elde edilen veriler Şekil 8’de gösterilmektedir. Şekil 8’de görüldüğü gibi, ısı borusunun direnci tüm koşullar altında saf suya kıyasla nanoakışkan çözeltisi için daha düşük değerlerde olmuştur. Duvar sıcaklıklarından da anlaşılacağı üzere, bu durum sabit bir ısı girdisinde evaporatör ve kondenser bölgelerinin ortalama sıcaklıklarının nanoakışkan kullanıldığında daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. 300 W ısı güç ve 6 g/s soğutma suyu debisinde yapılan testler neticesinde en yüksek iyileştirme oranı gözlemlenmiş olup, saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusunun ısı direnci 0,168 K/W değerinden 0,15 K/W değerine düşürülmüş, böylece ısı dirençte %10,9 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Buna karşın en düşük iyileştirme oranı ise %3,57 olarak 150 W ısı güç ve 9 g/s soğutma suyu debisinde elde edilmiştir.

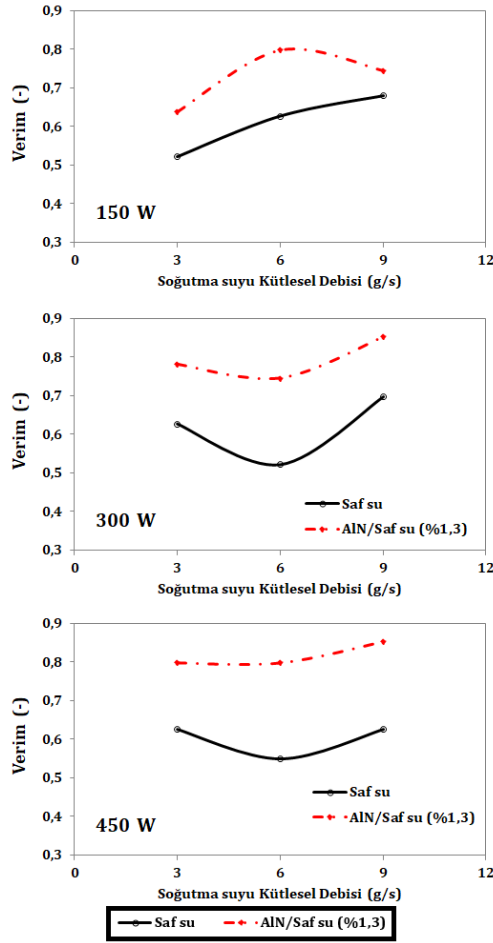


**Şekil 8.** Isı borusunun ısı direncindeki değişim ve iyileştirme oranları.

Isı borusunun verimindeki değişimler incelendiğinde ise saf su yerine AlN/saf su nanoakışkanı kullanıldığında verimde büyük ölçüde artış sağlanabileceği gözlemlenmiştir. Isıtıcı gücünün artmasıyla verimdeki artış oranının daha büyük olduğu, yüksek ısıtıcı güçleri ve ortalama soğutma suyu debisi koşullarında ise nispeten daha küçük verim değerleri elde edildiği saptanmıştır. 450 W ve 6 g/s çalışma koşullarında yapılan deneylerde maksimum verim artış oranının en büyük değere ulaştığı (%45,6) gözlemlenmiştir (Şekil 9). Bunun bir sonucu olarak maksimum verim eldesi için ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debisi optimizasyonu gerçekleştirilebilir.

Elde edilen bu bulgular literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların mantıklı ve birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Örneğin, Martin vd. hazırlamış oldukları sulu Fe-CuO hibrit nanoakışkanı ile düz bir ısı borusunda yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda ısı borusunun veriminde %72,63 oranında artma, ısı direncinde ise %16,91 oranında azalma elde ettiklerini bildirmişlerdir. Ayrıca, bu çalışmanın da benzer bir sonucu olarak, artan ısıtıcı gücüne paralel olarak her bir akışkan için genellikle ısı direnci değerlerinde bir azalma olduğunu belirtmişlerdir [17]. Benzer şekilde, Sarafraz vd. termosifon tipi bir ısı borusunda biyolojik olarak ürettikleri gümüş-saf su nanoakışkanı kullanarak yaptıkları deneyler sonucunda iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında, evaporatör bölümünden kondenser bölümüne doğru sıcaklık dağılımının azaldığını ve nanoparçacık derişiminin optimum derişim değerini aştığında ısı performansta daha iyi sonuçlar elde edildiğini bildirmişlerdir [6]. Huminc vd. demir nanoparçacıkları içeren ve farklı derişimlerde hazırlanmış nanoakışkan çözeltileri ile termosifon tipi ısı borusunda yapmış oldukları çalışma sonucunda, %2 ve %5,3 derişim oranları için ısı borusu veriminde sırasıyla %39 ve %42 oranlarında artış sağlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, nanoparçacık derişim oranının artmasıyla ısı direncin de azaldığını gözlemlenmiştir [18].





Şekil 9. Saf su ve AlN/saf su nanoakışkanı için ısı borusunun verimi.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada düz bir ısı borusunda iş akışkanı olarak saf su yerine içerisinde AlN nanoparçacıkları içeren sulu nanoakışkan çözeltisi kullanımının ısı borusu performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Ortalama 60-70 nm boyutlara sahip AlN nanoparçacıkları ile ağırlıkça %0,2 oranında Triton X-100 yüzey aktif maddesi içeren, ağırlıkça toplam derişimi %1,3 olan AlN/saf su nanoakışkanı hazırlanmış ve çeşitli ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debilerinde deneyler yapılmıştır. Deneysel veriler ışığında hem saf su hem de hazırlanan nanoakışkan çözeltisi için ısı borusu duvar sıcaklıklarındaki değişimler incelenmiş, ısı borusunun ısıl direnci ve verimindeki değişimler belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:




- İş akışkanı olarak nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu duvar sıcaklıklarının ve kaynama noktasının önemli ölçüde düşürüldüğü gözlemlenmiştir.
- Saf su yerine AlN nanoakışkanı kullanıldığında ısı borusunun ısıl direncinde %10,9'a varan oranlarda düşüş sağlanmıştır.
- Isı borusunun veriminde nanoakışkan kullanımıyla maksimum %45,6 oranında bir artış elde edilmiştir.
- AlN nanoakışkanının ısı borusunda kullanımının sağlayacağı faydalar ortaya konulmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sözen A., Variyenli Hİ., Özdemir MB., Gürü M. Upgrading the thermal performance of parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers using MgO nanofluid. *Heat Transfer Research*, 48(419–434), (2017).

- [2] Çiftçi, E. (2020). *Nanoakışkanların Kaynama-Yoğuşma Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-42.
- [3] Chen YJ., Wang PY., Liu ZH., Li, YY. Heat transfer characteristics of a new type of copper wire-bonded flat heat pipe using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67(548-559), (2013).
- [4] Sadeghinezhad E., Mehrali M., Rosen MA., Akhiani AR., Latibari ST., Mehrali, M., Metselaar, HSC. Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 100(775-787), (2016).
- [5] Gürü M., Sözen A., Karakaya U., Çiftçi E. Influences of bentonite-deionized water nanofluid utilization at different concentrations on heat pipe performance: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 148(632-640), (2019).
- [6] Sarafraz MM., Hormozi F., Peyghambarzadeh SM. Thermal performance and efficiency of a thermosyphon heat pipe working with a biologically ecofriendly nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57(297-303), (2014).
- [7] Qu J., Wu HY., Cheng P. Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> water nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(111-115), (2010).
- [8] Xu Y., Xue Y., Qi H., Cai W. Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 157(119727), (2020).
- [9] Utomo AT., Poth H., Robbins PT., Pacek AW. Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(7772-7781), (2012).
- [10] Akbari A., Saidi MH. Experimental investigation of nanofluid stability on thermal performance and flow regimes in pulsating heat pipe. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(1835-1847), (2019).
- [11] Y. Aydın D., Gürü M., Sözen A. Preparation of bauxite/deionized water nanofluid and experimental investigation of its thermophysical properties. *Politeknik Dergisi*, (basımda).
- [12] Dehaj MS., Mohiabadi MZ. Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191(91-99), (2019).
- [13] Pandiaraj P., Gnanavelbabu A., Saravanan P. Experimental and statistical analysis of MgO nanofluids for thermal enhancement in a novel flat plate heat pipes. *International Journal of Nanoscience*, 17(1760018), (2018).
- [14] Aytaç İ., CuO/su ve ZnO/su nanoakışkanların ısı borusu performansına etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, (basımda).
- [15] Holman, J. P. (2001). *Experimental methods for engineers* (7th edition). New York: McGraw-Hill.
- [16] Bianco, V., Manca, O., Nardini, S. and Vafai K., (2015). *Heat transfer enhancement with nanofluids*. New York: CRC Press, 150.
- [17] Martin K., Sözen A., Çiftçi E. and Ali HM. An experimental investigation on aqueous Fe–CuO hybrid nanofluid usage in a plain heat pipe. *International Journal of Thermophysics*, 41(135), (2020).
- [18] Humnic G., Humnic A., Morjan I. and Dumitrache F. Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(656-661), (2011).

## Investigation of tensile properties of hybrid polymer matrix and glass fiber reinforced polymer composites

 Neslihan GÖKÇE<sup>1,\*</sup>  Şevki EREN<sup>2</sup>  Serkan SUBAŞI<sup>3</sup> 
<sup>1</sup> Düzce University, Institute of Science, Interdisciplinary Composite Materials Technologies, Konuralp/DÜZCE

<sup>2</sup> Kırşehir Ahi Evran University, Vocational school, Department of Construction Technology, 4034, Merkez/KIRŞEHİR

<sup>3</sup> Duzce University, Faculty of Technology, Civil Engineering, Konuralp/DÜZCE

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 15/06/2020

Revision: 25/09/2020

Accepted: 13/10/2020

#### Highlights

- Hybrid matrix.
- Polymer composite.
- Tensile strength

#### Keywords

 Hybrid Matrix  
 Polymer Composite  
 Polyester  
 Vinyl-ester  
 Glass Fiber  
 Tensile Strength

In this study, hybrid matrix mixtures with different matrix phase resin types were prepared and 5%, 10% and 20% chopped E type glass fibers were added to these mixtures. The orthophthalic, isophthalic and terephthalic polyester resins were each mixed with each other and epoxy-based vinyl ester resin in different combinations as double and triple hybrid matrix mixtures. The tensile properties of the composites produced were determined. As a result of the study, as the fiber ratio increased, the hybrid matrix composites were seen to turn into a more rigid structure and the highest tensile mechanical properties were obtained in the blends containing 20% fiber and vinyl ester resin. It was determined that orthophthalic + vinyl ester (OV) mixture has the highest rigidity in all mixtures prepared with two types of hybrid resin matrix. When the tensile properties of the composites with two types and three types of hybrid resin matrix were compared with each other, it was seen that there were no significant differences.

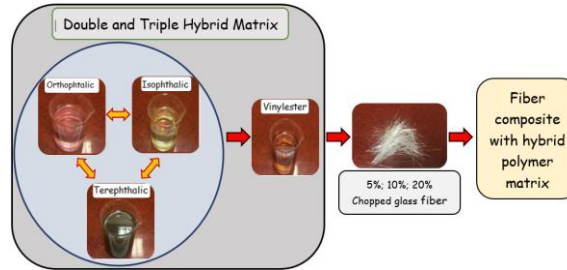


Figure A. Fiber composite with hybrid polymer matrix

**Purpose:** In this study, the tensile properties of the hybrid matrix and glass fiber composites, whose matrix phase is composed of different resin types and formed by adding glass fiber in different proportions, were investigated.

**Theory and Methods:** In the study, in the first stage, orthophthalic, isophthalic and terephthalic polyester resins were mixed in different combinations with epoxy-based vinylester resin to form double and triple hybrid matrix mixtures. Methyl ethyl ketone peroxide (MEKP; Akperox A60) was used as the initiator and cobalt octoate (Co; Akcobalt) was used as the initiator for polymerization. In the second stage, composites were produced by reinforcing E type chopped glass fiber at the ratio of 5%, 10%, and 20% by weight into hybrid matrix mixtures prepared in different combinations. In total, composites were produced in 10 different combinations. Tensile tests were carried out on the composite produced.

**Results:** It was determined that the highest tensile properties in all hybrid matrix composites are obtained in blends at the ratio of 20% fiber and containing vinyl ester resin. Also, the orthophthalic + vinyl ester (OV) mixture had the highest rigidity in all mixtures prepared with two types of the hybrid resin matrix. When the tensile properties of two types and three types of hybrid resin matrix composites were compared, no significant differences were observed.

**Conclusion:** As the fiber ratio increased, it was determined that hybrid matrix composites had a more rigid structure. Also, the results have led to the conviction that orthophthalic resin is better suited to vinyl ester resin, and it was concluded that it would be more meaningful to use two types of the hybrid matrix instead of three types of hybrid matrix.



## Hibrit polimer matrisli ve cam lifli takviyeli polimer kompozitlerin çekme özelliklerinin İncelenmesi

Neslihan GÖKÇE<sup>1</sup>, \* Şevki EREN<sup>2</sup>, Serkan SUBAŞI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri, Konuralp/DÜZCE

<sup>2</sup> Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, 4034, Merkez/KIRŞEHİR

<sup>3</sup> Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Konuralp/DÜZCE

### Öz

Bu çalışmada, matris fazı farklı reçine türlerinden oluşan hibrit matrisli karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlar içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında kırılmış E tipi cam lifleri ilave edilmiştir. Ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polye ester reçinelerinin her biri kendi aralarında ve daha sonra epoksi bazlı vinilester reçine ile farklı kombinasyonlarda ikili ve üçlü hibrit matrisli karışımlar oluşturacak şekilde karıştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin çekme özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, lif oranı arttıkça, hibrit matrisli kompozitlerin daha rijit bir yapıya dönüştüğü görülmüş ve en yüksek çekme mekanik özellikleri %20 lif oranında ve vinilester reçinesinin bulunduğu karışımlarda elde edilmiştir. İki tip hibrit reçine matrisli olarak hazırlanan tüm karışımlar içerisinde ortoftalik + vinilester (OV) karışımının en yüksek rijitliğe sahip olduğu belirlenmiştir. İki tip ve üç tip hibrit reçine matrisli kompozitlerin çekme özellikleri birbirleriyle karşılaştırıldığında, anlamlı farklılıkların oluşmadığı görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 15/06/2020  
Düzeltilme: 25/09/2020  
Kabul: 13/10/2020

### Anahtar Kelimeler

Hibrit Matris  
Polimer Kompozit  
Poliester  
Vinil-ester  
Cam Lifi  
Çekme Dayanımı

### Investigation of tensile properties of hybrid polymer matrix and glass fiber reinforced polymer composites

### Abstract

In this study, hybrid matrix mixtures with different matrix phase resin types were prepared and 5%, 10% and 20% chopped E type glass fibers were added to these mixtures. The orthophthalic, isophthalic and terephthalic polyester resins were each mixed with each other and epoxy-based vinyl ester resin in different combinations as double and triple hybrid matrix mixtures. The tensile properties of the composites produced were determined. As a result of the study, as the fiber ratio increased, the hybrid matrix composites were seen to turn into a more rigid structure and the highest tensile mechanical properties were obtained in the blends containing 20% fiber and vinyl ester resin. It was determined that orthophthalic + vinyl ester (OV) mixture has the highest rigidity in all mixtures prepared with two types of hybrid resin matrix. When the tensile properties of the composites with two types and three types of hybrid resin matrix were compared with each other, it was seen that there were no significant differences.

### Keywords

Hybrid Matrix  
Polymer Composite  
Polyester  
Vinyl-Ester  
Glass Fiber  
Tensile Strength

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan polimerik matris malzemeleri epoksiler, vinil esterler, doymamış polye ester reçineler (UPR) ve fenolik reçinelerdir [1]. Bu matris malzemeleri, yaygın olarak cam lifli takviyeli kompozitlerde kullanılır. Bu tür polimerlerde değişik reçine formülasyonları kompozitin çok geniş bir aralıkta farklı özelliklere sahip olmasını sağlar [2]. UPR, temel yapıtaşının yapısına bağlı olarak tiplere ve sınıflara ayrılır. Bunlar, ortoftalik anhidrit, izoftalik anhidrit, tereftalik anhidrit, bisfenol-fumarat, klorendik ve disiklopentadiendir [3,4]. Ortoftalik reçineler en yaygın kullanılan reçinelerdir, ancak düşük termal kararlılığa ve kimyasal dirence sahiptirler. Rijittirler, çatlamalara karşı dirençlidirler ve açık renklidirler [3-5]. İzoftalik reçineler üstün kaliteye sahiptir, daha iyi kimyasal ve termal direnç gösterir ve iyi derecede alev direnci gösterirler [5]. Epoksi ve UPR iyi yapışma kabiliyetine sahiptir, ancak rijit yapıdadırlar [6-8]. Vinil ester reçineleri, bir reaktif seyreltici olarak çoklu bir metakrilat oligomer (tipik

olarak bisfenol-A bazlı) ve stirenden oluşur [9]. Bu malzemeler, epoksi reçinelerinin mekanik ve termal özelliklerini UPR'nin hızlı kürlenmesi ile birleştirmek için geliştirilmiştir. Bu optimizasyon, bu reçineleri büyük, yüksek performanslı cam takviyeli kompozitler için matris olarak özellikle uygun hale getirir [10].

Hibrit polimer matrisli kompozitlerde, farklı matrisli bir karışıma bir tür takviye malzemesi ilave edilebilir veya iki veya daha fazla takviye ve dolgu malzemesi tek bir matriste karıştırılabilir veya her iki yaklaşım da birleştirilerek kullanılabilir [11-13]. Prabu ve Alagar, iki veya daha fazla polimerden oluşan hibrit kombinasyonlardan oluşan çapraz bağlı polimer ağ teknolojisinin şu anda acil olarak araştırılması gerektiğini ifade etmektedir [14]. Hibrit kompozitler ile spesifik özelliklerin daha fazla kontrol altına alınması, herhangi bir kompozit malzemenin avantaj ve dezavantajları bakımından daha olumlu bir denge oluşturulması mümkün olmaktadır [15]. Hibrit kompozitler dengeli termal kararlılık, düşük ağırlık/maliyet, kararlı dayanım ve sertlik, daha iyi yorulma direnci, darbe dayanımı, kırılma tokluğu sunar [13], [15], [16].

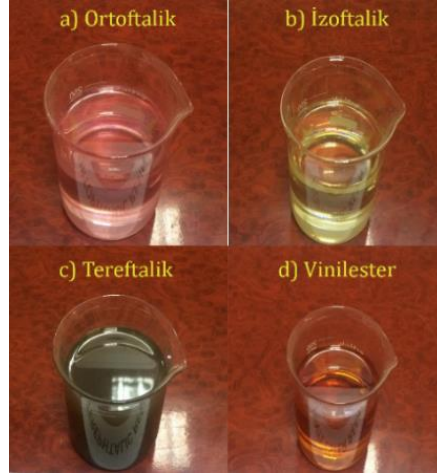
Prabu ve Alagar [14] çalışmalarında silikonlu poliüretan (PU)-epoksi ve silikonlu PU-UPR çapraz bağlantılı ağ (ICN) kaplamaları geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda epoksi ve UPR içerisine PU (% 2.5–20) ve silikon (% 10) ilavesinin ICN oluşumuna bağlı olarak mekanik özellikleri artırdığını belirlemişlerdir. Ruban, vd. [17], çalışmalarında, UPR ile sertleştirilmiş epoksi ve aminle modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) hibrit nanokompozitler için değişen konsantrasyonlarda ICN geliştirmişlerdir. Epoksi reçineye amin ile modifiye edilmiş MWCNT partiküllerinin ağırlıkça % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında dahil edilmesinin, nano kompozit oluşumuna bağlı olarak çekme mukavemetini %9.31, 17.3 ve 25 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Epoksi reçineye hem aminle modifiye edilmiş MWCNT partiküllerinin hem de UPR'nin eklenmesi, yüzdelik içeriklerine göre çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti değerlerini iyileştirmiştir. Reddy ve ark. [18], lif takviyesinin kompozitin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için yapmış oldukları bir çalışmada çekme dayanımı ve çekme E modülünün artan lif takviyesi ile yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır. Guermazi ve ark. [19], cam ve karbon lifleri ve epoksi matrisi ile hazırladıkları hibrit kompozitler üzerinde gerçekleştirdikleri mekanik testlerde lif içeriği artırıldığında elastikiyet modülü artışını açıkça gözlemişlerdir. You ve ark. [20], çalışmalarında, beton yapılar için kullanılmak üzere, takviye malzemesi olarak karbon ve E-cam lifinden oluşan, matris yapı olarak vinilester ve UPR'den oluşan plastik çubukların yapısını belirlemeyi amaçlamışlardır. Test sonuçlarında, nihai çekme dayanımı değerinin, %37 cam lifi ve %23 karbon lifinden oluşan dağınık tipteki hibrit çubukta elde edildiğini ve hibrit olmayan karbon lifli çubuğa kıyasla %3-33 oranında arttığını belirlemişlerdir. Atiqah ve ark. [21], %70 oranında sabit içeriğe sahip poliester reçine ile toplamı %30 olacak şekilde farklı hacim oranlarında keçe formunda, kırılmış kenaf ve cam liflerini hibrit olarak birleştirerek güçlendirilmiş kompozitler üretmiştir. En yüksek çekme dayanımı, UPR (hacimce %70) + işlenmemiş Kenaf (hacimce %15) + kırılmış keçe E-cam lifleri (hacimce %15) hibrit kompozitinde elde etmişler ve bu karışımdaki çekme dayanımını 39.28 MPa olarak belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada ise, Raja [22], uçucu kül emdirilmiş, kırılmış E-cam lifi keçe takviyeli UP reçineli kompozitler üzerinde çekme testleri gerçekleştirmiş ve lif oranının artırılmasıyla çekme dayanımlarının artış gösterdiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada, matris fazı farklı reçine türlerinden oluşan hibrit matrisli kompozitler içerisine farklı oranlarda cam lifi ilavesinin çekme özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyester reçinelerinin her biri kendi aralarında ve daha sonra epoksi bazlı vinilester reçine ile farklı kombinasyonlarda ikili ve üçlü hibrit matrisli karışımlar oluşturacak şekilde karıştırılmış ve üretilen kompozitlerin çekme özellikleri belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIALS and METHODS)

### 2.1. Matris Malzemeleri (Matrix Materials)

Bu çalışmada, Poliya Polyester San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen ortoftalik polyester reçinesi (1.12 gr/cm<sup>3</sup>, %43 katı içerik, POLIPOL 3562-SR), izoftalik polyester reçinesi (1.067 gr/cm<sup>3</sup>, %42 katı içerik, POLIPOL 3873-SR), tereftalik polyester reçinesi (1.12 gr/cm<sup>3</sup>, %42 katı içerik, POLIPOL 3570-SR) ve bisfenol-A bazlı epoksi vinil ester reçinesi (1.044 gr/cm<sup>3</sup>, %42 katı içerik, POLIVES 701) kullanılmıştır. Polimerizasyon için Akpa Kimya'dan temin edilen, başlatıcı olarak metil etil keton peroksit (MEKP; Akperox A60) ve hızlandırıcı olarak kobalt oktoat (Co; Akcobalt) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan reçineler Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. UPR ve bisfenol-A bazlı vinil ester reçineler

## 2.2. Takviye Malzemeleri (Reinforcing Materials)

Takviye malzemesi olarak, CAM ELYAF Firmasından temin edilen; E tipi cam lifi (KCR6H-2400-E) malzemesi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan reçineler ve kırılmış E cam lifi Şekil 2'de gösterilmiştir. E tipi cam lifine ait fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Kırılmış E cam lifi

Tablo 1. Çalışmada kullanılan kırılmış liflerin fiziksel özellikleri.

Özellik	Cam lifi
Lif çapı (micron)	11-13
Tex Sayısı (Lif ağırlığı (g/km))	2280-2520
Nem miktarı (%)	Max. 0.1
Kızdırma Kaybı (%)	0.6-0.9
Özgül Ağırlık	2.60
Lif uzunluğu (cm)	5

## 2.3. Cam Lifi Takviyeli Hibrit Matrisli Reçine Karışımlarının Hazırlanması (Preparation of Glass Fiber Reinforced Hybrid Matrix Resin Blends)

Çalışmada, ilk aşamada, ortoftalik, izofthalik ve tereftalik polyester reçineleri, epoksi bazlı vinilester reçine ile farklı kombinasyonlarda, ikili ve üçlü hibrit matrisli karışımlar oluşturacak şekilde karıştırılmıştır. İkinci aşamada, farklı kombinasyonlarda hazırlanan hibrit matrisli karışımların içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında E tipi kırılmış cam lifi takviye edilerek kompozitler üretilmiştir. Toplamda 10 farklı kombinasyonda kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozit üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen deneysel çalışma planı Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Lif takviyeli reçine karışımları için yapılan deneysel çalışma planı

Numune No	Numune Bileşeni	Numune kodu	Lif takviyesi (%)	Testler
1	Ortoftalik + Vinilester	OV		
2	İzoftalik + Vinilester	IV		
3	Tereftalik + Vinilester	TV		
4	Ortoftalik + İzoftalik	OI		
5	Ortoftalik + Tereftalik	OT	5	Çekme dayanımı
6	Tereftalik + İzoftalik	TI	10	
7	Ortoftalik + İzoftalik + Tereftalik	OIT	20	
8	Ortoftalik + İzoftalik + Vinilester	OIV		
9	Tereftalik + İzoftalik + Vinilester	TIV		
10	Ortoftalik + Tereftalik + Vinilester	OTV		

**Kalıp Hazırlığı:** Hibrit kompozitler üretmek için 4 mm kalınlığında cam plaka kalıpları kullanılmıştır. Cam plaka yüzeylerinin köşeleri 4mm kalınlığında kauçuk contalarla yapıştırılmıştır. Plakalara, ince bir film oluşturacak şekilde spray vaks kalıp ayırıcı püskürtülmüş ve hemen temiz kuru bir bezle silinmiş ve cilalanmıştır. Vaks filminin tamamen kuruması için 15-20 dakika beklenilmiştir.

**Hibrit Reçine Karışımlarının Hazırlanması:** Her bir hibrid matrisli reçine karışımı için toplam 550 gr'lık karışım oluşturulmuş ve bu karışımlar bir cam beher içinde 3-5 dakika homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Cam beher içinde 23 °C sabit bir sıcaklıkta tutulan reçine karışımlarına toplam reçine miktarının ağırlıkça %1'i oranında hızlandırıcı kobalt ilave edilmiş ve bir cam babet ile 2-3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra toplam reçine miktarının ağırlıkça %1.5'i oranında başlatıcı MEKP ilave edilmiştir.

**Cam lifi İlavesi:** Hazırlanan reçine karışımları, cam kalıplara ince bir film elde edecek biçimde fırça yardımı ile uygulanmış ve hemen ardından kırılmış lifler cam kalıplar içerisine homojen şekilde serpilerek yerleştirilmiştir. Rulo yardımıyla lifler reçineyle tamamen emdirildikten sonra arta kalan reçine dökümü ilavesi yapılmış ve plakalar mengene ile kenetlenmiştir. Lif takviyeli hibrit matrisli kompozitlerin üretim işlemleri ile ilgili görsel Şekil 3'te verilmiştir.

**Kür İşlemi:** Tüm kompozitler ISO 291'e göre 12 saat laboratuvar koşullarında tutulmuş ve sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir [23]. Sertleştirilmiş plakalar dikkatlice cam kalıptan çıkarılmış ve fırında toplam 3 saat süreyle, 50 °C'de 1 saat, 80 °C'de 1 saat ve son olarak 110 °C'de 1 saat süreyle kürlenmeye tabi tutulmuştur. Sertleştirme tamamlandıktan sonra, fırın kapağı açık bırakılmış ve plakalar soğumaya bırakılmıştır. Hazırlanan lif takviyeli hibrit reçine karışımlarının görseli Şekil 4'te verilmiştir.

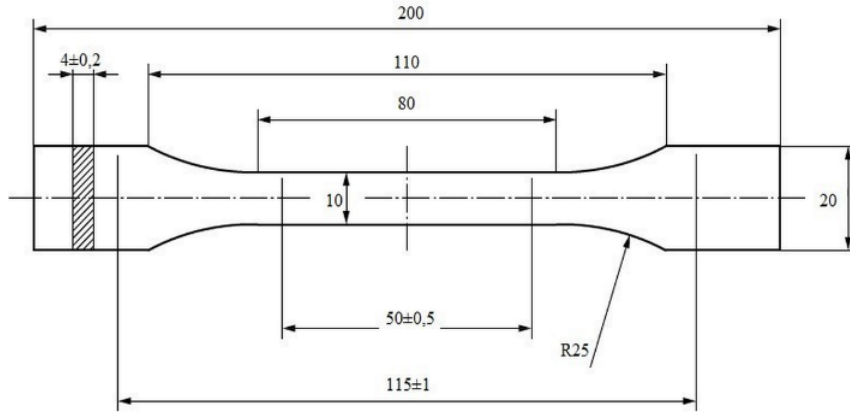
**Şekil 3.** Hibrit matrisli cam lifli kompozit üretimi



**Şekil 4.** Hibrit matrisli cam lifi takviyeli kompozitlere ait bir görsel

#### 2.4. Çekme Testi (Tensile Test)

Çekme testi numuneleri oda koşullarında 3 günlük bekleme süresinin ardından çekme testine tabi tutulmuşlardır. Çekme testi ISO 527-1 [127] standardına uygun olarak 1 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir [24]. Çekme testi numune boyutları Şekil 5'te ve çekme testine ait bir görsel Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 5.** Çekme testi numune boyutları



**Şekil 6.** Çekme testi



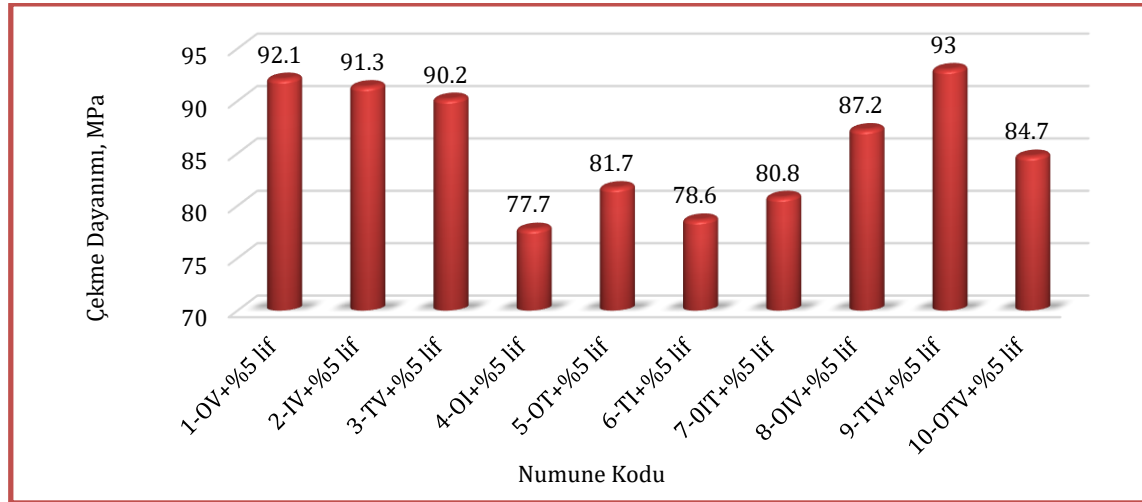
### 3. BULGUAR (RESULTS)

#### 3.1. %5 Cam Lifi Takviyeli Hibrit Matrisli Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları (Tensile Test Results of 5% Glass Fiber Reinforced Hybrid Matrix Composites)

Hibrit reçineler içerisinde ağırlıkça %5 oranında cam lifi takviye edilerek üretilen numunelerin çekme test bulguları Tablo 3'te verilmiştir. Ortalama çekme dayanımının grafik olarak gösterimi Şekil 7'de ayrıca verilmiştir.

**Tablo 3.** %5 cam lifi takviyeli hibrit matrisli kompozitlerin çekme testi sonuçları

Numune No	Numune kodu	Çekme Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme uzaması (%)
1	OV + %5 lif	4265	92.1	0.68
2	IV + %5 lif	4078	91.3	0.95
3	TV + %5 lif	4093	90.2	0.92
4	OI + %5 lif	4554	77.7	0.64
5	OT + %5 lif	4703	81.7	0.68
6	TI + %5 lif	3973	78.6	0.72
7	OIT + %5 lif	4434	80.8	0.68
8	OIV + %5 lif	4684	87.2	0.86
9	TIV + %5 lif	3720	93.0	0.91
10	OTV + %5 lif	4735	84.7	0.74



**Şekil 7.** %5 cam lifi takviyeli hibrit matrisli karışımların ortalama çekme dayanımları

Çekme dayanımı sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %5 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%5) hibrit reçine karışımında 77,7 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı ise ortoftalik-vinilester (OV + %5) karışımında 92,1 MPa olarak belirlenmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %5 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) hibrit reçine karışımında 80,8 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme dayanımı ise terftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) karışımında 93 MPa olarak elde edilmiştir.

Çekme E modülü sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %5 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük çekme E modülü değeri terftalik-izoftalik (TI + %5) hibrit reçine karışımında 3973 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme E modülü ise ortoftalik-terftalik (OT+%5) karışımında 4703 MPa olarak elde edilmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %5 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük değer tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) hibrit reçine karışımında 3720 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme E modülü ise ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) karışımında 4735 MPa olarak elde edilmiştir.

Çekme uzama sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %5 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme uzaması sonuçlarına göre; en düşük çekme uzaması değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%5) hibrit reçine karışımında %0,64 olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme uzaması ise, izoftalik-vinilester (IV+%5) karışımında %0,95 olarak elde edilmiştir.

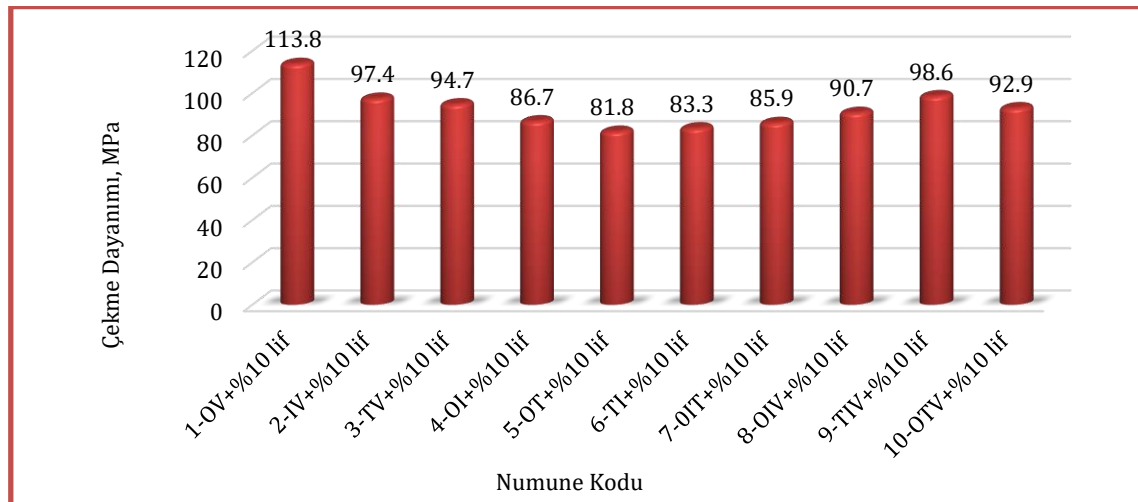
Üç tip reçine matrisli ve %5 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme uzaması sonuçlarına göre; en düşük çekme uzaması ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) hibrit reçine karışımında %0,68 olarak bulunmuştur. En yüksek çekme uzaması ise tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) karışımında %0,91 olarak elde edilmiştir.

### 3.2. %10 Cam Lifi Takviyeli Hibrit Matrisli Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları (Tensile Test Results of 10% Glass Fiber Reinforced Hybrid Matrix Composites)

Hibrit reçinelere içerisine ağırlıkça %10 oranında cam lifi takviye edilerek üretilen numunelerin çekme test bulguları Tablo 4'te verilmiştir. Ortalama çekme dayanımının grafik olarak gösterimi Şekil 8'de ayrıca verilmiştir.

**Tablo 4.** %10 cam lifi takviyeli hibrit matrisli kompozitlerin çekme testi sonuçları

Numune No	Numune kodu	Çekme Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme uzaması (%)
1	OV+%10 lif	5741	113.8	0.65
2	IV+%10 lif	4869	97.4	0.91
3	TV+%10 lif	5233	94.7	0.93
4	OI+%10 lif	5141	86.7	0.63
5	OT+%10 lif	5211	81.8	0.60
6	TI+%10 lif	4890	83.3	0.71
7	OIT+%10 lif	5730	85.9	0.65
8	OIV+%10 lif	5327	90.7	0.66
9	TIV+%10 lif	5615	98.6	0.89
10	OTV+%10 lif	5298	92.9	0.72



**Şekil 8.** %10 cam lifi takviyeli hibrit matrisli karışımların ortalama çekme dayanımı değerleri

Çekme dayanımı sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %10 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-tereftalik (OT+%10) hibrit reçine karışımında 81,8 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı ise ortoftalik-vinilester (OV+%10) karışımında 113,8 MPa olarak belirlenmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %10 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10) hibrit reçine karışımında 85.9 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme dayanım değeri ise tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%10) karışımında 98.6 MPa olarak elde edilmiştir.

Çekme E modülü sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %10 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük çekme E modülü değeri izoftalik-vinilester (IV+%10) hibrit reçine karışımında 4869 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme E modülü ise ortoftalik-vinilester (OV+%10) karışımında 5741 MPa olarak elde edilmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %10 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük değer ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%10) hibrit reçine karışımında 5298 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme E modülü ise ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10) karışımında 5730 MPa olarak elde edilmiştir.

Çekme uzama sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %10 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme uzama sonuçlarına göre; en düşük çekme uzaması ortoftalik-tereftalik (OT+%10) hibrit reçine karışımında %0.60 olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme uzaması ise, tereftalik-vinilester (TV+%10) karışımında %0.93 olarak elde edilmiştir.

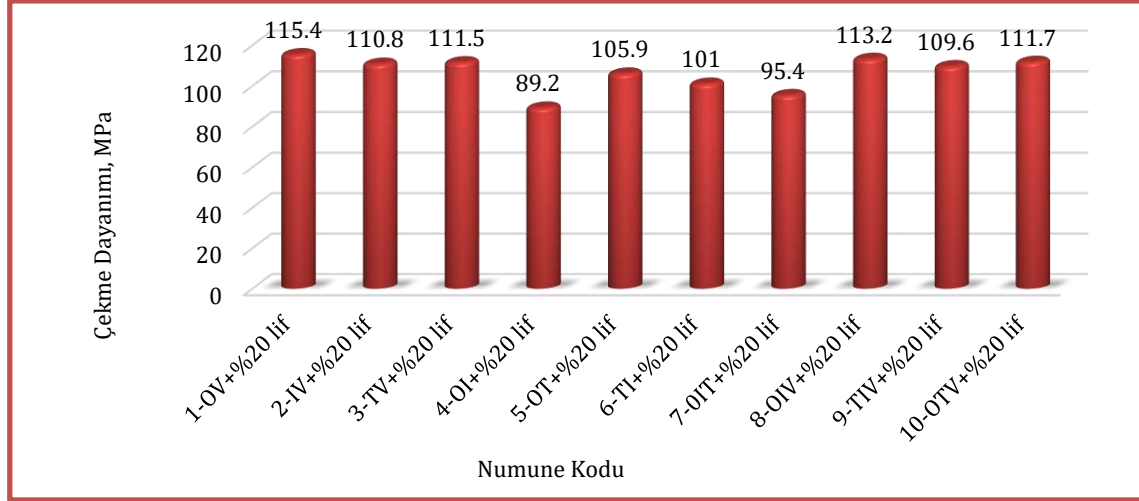
Üç tip reçine matrisli ve %10 cam lifi takviyeli kompozitlerin çekme uzaması sonuçlarına göre; en düşük çekme uzaması ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10) hibrit reçine karışımında %0.65 olarak bulunmuştur. En yüksek çekme uzaması ise tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%10) karışımında %0.89 olarak elde edilmiştir.

### 3.3. %20 Cam Lifi Takviyeli Hibrit Matrisli Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları (Tensile Test Results of 20% Glass Fiber Reinforced Hybrid Matrix Composites)

Hibrit reçineler içerisine ağırlıkça %20 oranında cam lifi takviye edilerek üretilen numunelerin çekme test bulguları Tablo 5'te verilmiştir. Ortalama çekme dayanımının grafik olarak gösterimi Şekil 9'da ayrıca verilmiştir.

**Tablo 5.** %20 cam lifi takviyeli hibrit matrisli kompozitlerin çekme testi sonuçları

Numune No	Numune kodu	Çekme Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme uzaması (%)
1	OV+%20 lif	7107	115.4	0.61
2	IV+%20 lif	6847	110.8	0.69
3	TV+%20 lif	6391	111.5	0.85
4	OI+%20 lif	6204	89.2	0.51
5	OT+%20 lif	6904	105.9	0.59
6	TI+%20 lif	6525	101.0	0.69
7	OIT+%20 lif	5785	95.4	0.63
8	OIV+%20 lif	7258	113.2	0.57
9	TIV+%20 lif	7146	109.6	0.80
10	OTV+%20 lif	7307	111.7	0.70



Şekil 9. %20 cam lifli takviyeli hibrit matrisli karışımların ortalama çekme dayanımı değerleri

Çekme dayanımı sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %20 cam lifli takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%20) hibrit reçine karışımında 89.2 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı ise ortoftalik-vinilester (OV+%20) karışımında 115.4 MPa olarak belirlenmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %20 cam lifli takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20) hibrit reçine karışımında 95.4 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme dayanımı değeri ise ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%20) karışımında 113.2 MPa olarak elde edilmiştir.

Çekme E modülü sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %20 cam lifli takviyeli kompozitlerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük çekme E modülü değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%20) hibrit reçine karışımında 6204 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme E modülü ise ortoftalik-vinilester (OV+%20) karışımında 7107 MPa olarak elde edilmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %20 cam lifli takviyeli kompozitlerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük değer ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20) hibrit reçine karışımında 5785 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme E modülü ise ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) karışımında 7307 MPa olarak elde edilmiştir.

Çekme uzama sonuçları: İki tip reçine matrisli ve %20 cam lifli takviyeli kompozitlerin çekme uzaması sonuçlarına göre; en düşük çekme uzaması ortoftalik-izoftalik (OI+%20) hibrit reçine karışımında %0.51 olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme uzaması ise, terftalik-vinilester (TV+%20) karışımında %0.85 olarak elde edilmiştir.

Üç tip reçine matrisli ve %20 cam lifli takviyeli kompozitlerin çekme uzaması sonuçlarına göre; en düşük çekme uzaması değeri ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%20) hibrit reçine karışımında %0.57 olarak bulunmuştur. En yüksek çekme uzaması ise terftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20) karışımında %0.80 olarak elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda, tüm hibrit matrisli kompozitlerde lif oranı arttıkça çekme dayanımı ve çekme E modülü değerlerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, literatürde farklı kombinasyonlarla üretilen hibrit matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında benzer sonuçların elde edildiği belirlenmiştir. Prabu ve Alagar [14] çalışmalarında silikonlu poliüretan (PU)-epoksi ve silikonlu PU-UPR çapraz bağlantılı ağ (ICN) kaplamaları geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda epoksi ve UPR içerisine PU (% 2.5–20) ve silikon (% 10) ilavesinin ICN oluşumuna bağlı olarak mekanik özellikleri artırdığını belirlemişlerdir. Ruban, vd. [17], çalışmalarında, UPR ile sertleştirilmiş epoksi ve aminle modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) hibrit nanokompozitler için değişen konsantrasyonlarda ICN geliştirmişlerdir. Epoksi reçineye amin ile modifiye edilmiş MWCNT partiküllerinin ağırlıkça % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında dahil edilmesinin, nano kompozit oluşumuna bağlı olarak çekme mukavemetini %9.31, 17.3 ve 25 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Epoksi reçineye hem aminle modifiye edilmiş MWCNT

partiküllerinin hem de UPR'nin eklenmesi, yüzdelik içeriklerine göre çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti değerlerini iyileştirmiştir. You ve ark. [20], çalışmalarında, beton yapılar için kullanılmak üzere, takviye malzemesi olarak karbon ve E-cam lifinden oluşan, matris yapı olarak vinilester ve UPR'den oluşan plastik çubukların yapısını belirlemeyi amaçlamışlardır. Test sonuçlarında, nihai çekme dayanımı değerinin, %37 cam lifi ve %23 karbon lifinden oluşan dağınık tipteki hibrit çubukta elde edildiğini ve hibrit olmayan karbon lifli çubuğa kıyasla %3-33 oranında arttığını belirlemişlerdir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Matris yapıyı oluşturan farklı türlerdeki reçinelerin hibrit olarak birlikte karıştırılması ve bu karışımlara farklı oranlarda kırılmış E cam lifi ilave edilmesi ile üretilen hibrit matrisli kompozitlerin çekme testleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Tüm hibrit matrisli kompozitlerde lif oranı arttıkça çekme dayanımı ve çekme E modülü değerlerinin de artış gösterdiği belirlenirken, kopma uzaması değerlerinde ise azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bir malzemenin çekme dayanımı ve E- modülü artarken kopma uzamasının azalması malzemenin daha rijit bir yapıya dönüştüğünün bir göstergesidir. Çalışmada elde edilen sonuçlarla, lif oranı artışının hibrit matrisli kompozitleri daha rijit bir yapıya dönüştürdüğü belirlenmiştir.

Tüm hibrit matrisli kompozitlerde en yüksek çekme özelliklerinin %20 lif oranında ve vinilester reçinesinin bulunduğu karışımlarda elde edildiği belirlenmiştir.

İki tip hibrit reçine matrisli karışımların çekme özellikleri değerlendirildiğinde, (OV) karışımının tüm karışımlar içerisinde en yüksek rijitliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bu iki reçinenin bir arada bulunduğu üçlü karışımlar içerisindeki rijitlik değerlerinde de yüksek değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bu durum, ortoftalik reçinesinin vinilester reçinesi ile daha iyi uyum sağladığı kanaatini oluşturmuştur.

İki tip ve üç tip hibrit reçine matrisli kompozitlerin çekme özellikleri birbirleriyle karşılaştırıldığında, anlamlı farklılıkların oluşmadığı görülmüştür. Bu nedenle üç tip hibrit matrisli karışım yerine iki tip matrisli karışımların kullanılmasının daha anlamlı olacağı kanaatine varılmıştır.



İki veya daha fazla polimerden oluşan hibrit kombinasyonlu kompozitlerin daha fazla araştırılması gerektiği düşünülmektedir. Hibrit matrisli kompozitler ile spesifik özelliklerin daha fazla kontrol altına alınmasıyla, herhangi bir kompozit malzemenin avantaj ve dezavantajları bakımından daha olumlu bir denge oluşturulması mümkündür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Balasubramanian M. Composite materials and processing: Polymer matrix composites. CRC Press, 2013.
- [2] Callister WD and Rethwisch JG. Materials Science and Engineering. 8th ed. John Wiley & sons, 2013.
- [3] Zask OC and Goodman SH. Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Resins, in Handbook of Thermoset plastics, 1999.
- [4] Boenig HV. Unsaturated Polyesters: Structure and Properties. Elsevier Publishing Company, 1964.
- [5] Johnson KG and Yang LS. Preparation, Properties and Applications of Unsaturated Polyesters in Modern Polyesters: Chemistry and technology of polyesters and copolyesters. 697–713, 2004.
- [6] Lin MS, Liu CC & Lee CT. “Toughened interpenetrating polymer network materials based on unsaturated polyester and epoxy”. Journal of Applied Polymer Science, 72(4), 585-592, 1999.
- [7] Yee AF, Pearson RA. “Toughening mechanisms in elastomer-modified epoxies”. Journal of Materials Science, 21(7), 2462-2474, 1986.
- [8] Yang YS, Suspene L. “Curing of unsaturated polyester resins: Viscosity studies and simulations in pre-gel state”. Polymer Engineering & Science. 31(5), 321-332, 1991.

- [9] TP O . Vinyl esters in engineered materials handbook. Eng. Plast 2: 272-275, 1988.
- [10] Astrom BT. Manufacturing of polymer composites. CRC Press, 1997.
- [11] Thwe MM, Liao K. “Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites”. *Compos Sci Technol*, 63, 375–87, 2003.
- [12] Fu SY, Xu G, Mai YW. “On the elastic modulus of hybrid particle/short-fiber/polymer composites”. *Compos Part B Eng.*, 33, 291–9, 2002.
- [13] Szeluga U, Kumanek B, & Trzebicka B. “Synergy in hybrid polymer/nanocarbon composites. A review”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, 204-231, 2015.
- [14] Prabu AA, Alagar M. “Mechanical and thermal studies of intercross-linked networks based on siliconized polyurethane-epoxy/unsaturated polyester coatings. *Progress In Organic Coatings*, 49(3), 236-243, 2004
- [15] Marom G, et al. “Hybrid effects in composites: conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour,” *Journal of Materials Science*, 13(7), 1419–1426, 1978.
- [16] Ferrante L, et all. “Behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites subjected to laser shock wave testing: Preliminary results”. *Composites Part B: Engineering*, 78, 162-173, 2015.
- [17] Ruban YJV, Mon SG, Roy DV. “Processing and thermal/mechanical studies of unsaturated polyester toughened epoxy composites filled with amine functionalized carbon nanotubes”. *International Journal of Plastics Technology*, 15(2), 133-149, 2011.
- [18] Reddy MI, Kumar MA, & Raju CRB. “Tensile and flexural properties of Jute, Pineapple leaf and glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites,” *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 458–462, 2018.
- [19] Guerhazi N, Haddar N, Elleuch K, & Ayedi HF. “Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures”. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 714-724, 2014.
- [20] You YJ, Park YH, Kim HY, & Park JS. “Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions”. *Composite structures*, 80(1), 117-122, 2007.
- [21] Atiqah A, Maleque MA, Jawaid M, & Iqbal M. “Development of kenaf-glass reinforced unsaturated polyester hybrid composite for structural applications”. *Composites Part B: Engineering*, 56, 68-73, 2014.
- [22] Raja RS, Manisekar K, & Manikandan V. “Study on mechanical properties of fly ash impregnated glass fiber reinforced polymer composites using mixture design analysis”. *Materials & Design*, 55, 499-508, 2014.
- [23] International Organization for Standardization. “Plastics-Standard Atmospheres for Conditioning and Testing”. ISO 291, 2008.
- [24] International Organization for Standardization. “Plastics-Determination of tensile properties- Part 1: General principles”. ISO 527-1, 2019.

## Application of Biomimetic Approach on Car Rim Design

 Muhammet Tahir DEMİR<sup>1,\*</sup>  Veysel ÖZDEMİR<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Turkish Standards Institution, Vehicle Project Group Presidency, Yenimahalle/Ankara

<sup>2</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Industrial Design Engineering, Yenimahalle/Ankara

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, rim design has been biomimetically evaluated in order to contribute to aerodynamic studies carried out with the sensitivity of increasing economic savings in the period since the invention of the automobile.

#### Article Info:

Research article  
 Received: 22/08/2020  
 Revision: 09/10/2020  
 Accepted: 15/10/2020

#### Highlights

- Car Rim Aerodynamics
- Flow Analysis
- From Biology to Design
- Peregrine Falcon Bird

#### Keywords

Aerodinamics  
 Car Rim Design  
 Biyomimetic

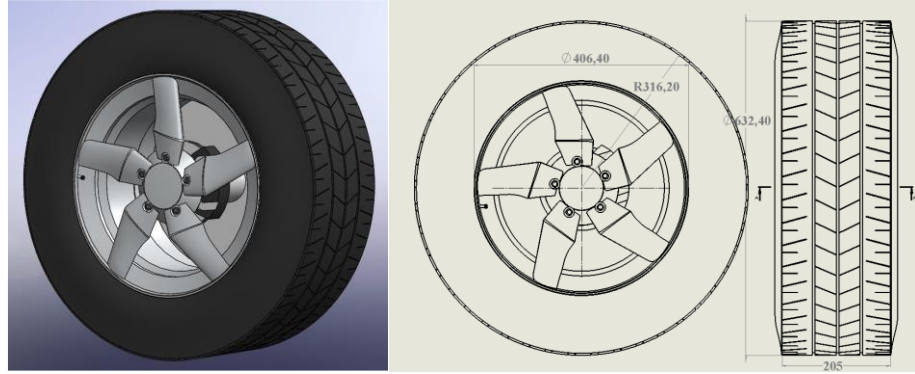


Figure A. Image of the rim designed with biomimetic approach

**Purpose:** In this study, deficiencies were determined by examining the previous wheel design studies. In this direction, the effect of the rim designed with biomimetic approach on wheel and vehicle aerodynamics has been revealed.

**Theory and Methods:** The rim design, inspired by the Peregrine Falcon bird, was modeled in computer environment with the Solidworks 2016 program, adopting the biomimetic science study methodology from biology to design. Honda Civic 1.6 i-VTEC Elegance car, which has a standard appearance, was compared with the rim used in 2007-2011 and improvements were revealed.

**Results:** Designed rim and standard rim were compared in terms of total pressure, total temperature, drag coefficient and friction force. Analyzes show that the design, inspired by the wing movements made by the Peregrine Falcon bird flying in the air, reduces the air resistance and positively affects the rim in terms of aerodynamics.

**Conclusion:** Decreasing this resistance force created by the air on the rim will increase the fuel economy of the vehicle. At the same time, it was concluded that the biomimetic approach is an important means for future designs in this field.



## Biyomimetik Yaklaşımın Jant Tasarımı Üzerinde Uygulanması

Muhammet Tahir DEMİR<sup>1,\*</sup> Veysel ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türk Standartları Enstitüsü, Araç Proje Grup Başkanlığı, Yenimahalle/Ankara

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/Ankara

### Öz

Kısıtlı, pahalı, geri dönüşümü olmayan ve çevreye duyarlı olmayan yakıtlar çeşitli nedenlerle insanlığa zarar vermektedir. Özellikle ulaşım sektöründe kullanılan yakıtlar çevreyi kirletmede öncü nedenlerdendir. Son zamanlardaki araçların emisyon değerlerini düşürmeye yönelik çalışmaların yanı sıra yakıt tasarrufu sağlamak amacıyla çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada özellikle 21. yy' da önemi artan enerji tasarrufu ar-ge çalışmalarının bir kolu olan aerodinamik araç tasarımında jant tasarımı ele alındı. Bu çalışmada biyomimetik bilimi çalışma metodolojilerinden biri olan 'biyolojiden tasarıma' yaklaşımı uygulandı. Bu yaklaşımın çözüm önerisine göre tasarlanan jantın piyasada en çok tercih edilen standart bir jant modeline göre aerodinamik yapısının hava sürtünme direncini azalttığı tespit edilmiştir. Böylelikle enerji tasarrufu sağlanmış ve jantın yüzey kalitesi artırılmıştır.

### Application of Biomimetic Approach on Car Rim Design

#### Abstract

Limited, expensive, non-recyclable and non-environmentally friendly fuels harm humanity for various reasons. Especially the fuels used in the transportation sector are among the leading factors for polluting the environment. Recently, there have been various studies to save fuel as well as works to reduce emission values of vehicles. In this study, rim design was discussed in aerodynamic vehicle design, which is an important branch of energy saving R&D studies and gained importance especially in the last two decades. The methodology from biology to design, which is one of the biomimetic science study methodologies, was applied. It has been determined that the aerodynamic structure of the rim, which is designed according to the solution proposal of this methodology, reduces the air friction resistance compared to a standard rim model most preferred in the market. Thus, energy was saved and the surface quality of the rim was improved.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 22/08/2020  
Düzeltilme: 09/10/2020  
Kabul: 15/10/2020

#### Anahtar Kelimeler

Aerodinamik  
Jant Tasarımı  
Biyomimetik

#### Keywords

Aerodynamics  
Car Rim Design  
Biomimetic

## 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji günümüzde insanlığın en önemli kaynağı durumuna gelmiştir. Artan teknolojiyle birlikte enerjiye olan bağımlılık artmakla birlikte enerjinin sürekliliğinin sağlanması ve kaynaklarının çoğaltılması elzem duruma gelmektedir. Artık enerjinin kullanımının yanısıra doğru ve tasarruflu kullanımı da önem arz etmektedir. Bu amaçlarla enerjinin sürekliliği için yenilebilir enerji kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi, fosil yakıtlara bağlı olarak kullanılan teknoloji ve aygıtların enerji tasarrufunun artırılması gibi çalışmalar en önemli araştırma ve geliştirme konuları olmuş ve olacaktır. Bu çalışma 2020 yılında yayımlanan çalışmamızın [1] devamı niteliğindedir.

Yayımlanmış çalışmada genel kapsamıyla tasarım çalışması kendi içinde değerlendirilmiş olup bu çalışmada tasarım çalışması piyasada bulunan bir model ile karşılaştırmalı olarak aerodinamik etkileri incelenerek sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.

Bu çalışmada jant kanat yapısının jant aerodinamiğine olan etkisi incelenmiş ve biyomimetik yaklaşımla yapılacak tasarımın kazandırdığı değerler ortaya konulmuştur.



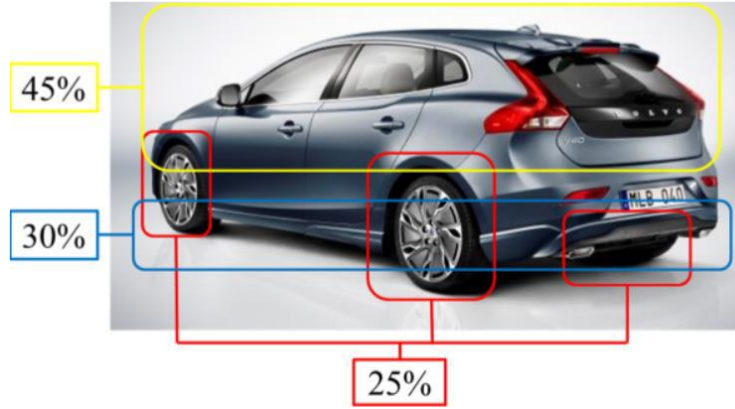
## 2. JANT AERODİNAMİĞİ (RIM AERODYNAMICS)

Bir karayolu aracının tasarım parametrelerinde en önemli aerodinamik etken sürüklenme kuvvetidir. Araç hareketine aksi yönde oluşan toplam direnç kuvveti kısmen tekerlekler ile zemin arasındaki yuvarlanma direncinden, kısmen de aerodinamik sürüklenme kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Aerodinamik sürüklenme kuvveti 65–80 km / h 'in üzerindeki hızlarda etkilidir. Bundan dolayı sürüklenme kuvvetinin düşürülmesi yakıt ekonomisi ve araç performansı açısından önemlidir [2].

**Tablo 1.** Sürüklenme direnç katsayısının tahmini dağılımı [2]

Sürüklemeye Etki Eden Faktörler	Cd
Yüzey Sürtünmesi	0,08
Basınç Etkisi	0,10
Tekerlerin Etkisi	0.08
Motor Soğutma Sisteminin Etkisi	0.03
Kenar Girdapları	0.01
Toplam	0.30

Gövde altı ve jant yuvaları birlikte aerodinamik sürtünme kuvvetinin büyük bir kısmından sorumlu olduğu için bu alanların büyük bir gelişme potansiyeli olduğu düşünülmektedir [3]. Aerodinamik mühendisleri, söz konusu alanlarla ve genel olarak araçlarla ilişkili etkileri anlamak, gerçek yol koşullarını doğru bir şekilde temsil etmek için birçok otomotiv rüzgar tüneline farklı zemin simülasyonu teknikleriyle güncellemiştir. Artan bilgisayar gücü, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) mühendislerinin simüle edilmiş bir ortamda test etmek için çok daha karmaşık ve ayrıntılı modeller oluşturmalarına izin vermiştir.



**Şekil 1.** Sürüklenme direnç katsayısının etki dağılımı [3]

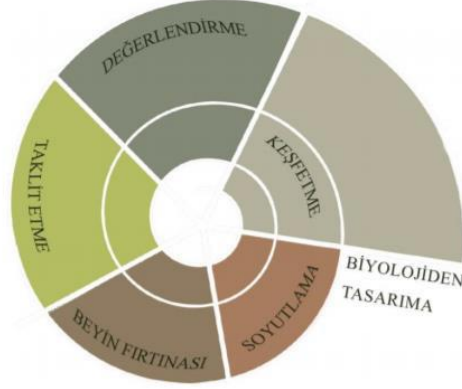
### 2.1. Biomimetik Tasarım- Doğanın Tekniğini Değerlendirme (Biomimetic Design- Evaluating Nature's Technique)

Ürün tasarımında doğanın tekniğini değerlendirme söz konusu olduğunda tasarımcı detaylı biyolojik bilgiye ihtiyaç duyar ve projenin derinliğine göre farklı disiplinlerden kimselerle ortak çalışma gerekliliği oluşur. Tasarımcının bakış açısı, teknik bilgi donanımı ve bu konudaki eğitimi bu yöntemi gerçekleştirebilmede önemli unsurlardır. Bu yöntemin tasarım için büyük bir potansiyeli vardır ve disiplinler arası güçlü iş birliği gerektiren bir yaklaşımdır [4].

Biomimetik tasarım konusunda araştırmacılar farklı yöntemler ortaya koymuştur. Bu yöntemler tasarım, mühendislik gibi alanlar için geliştirilmiş olup, biomimikri yaklaşımının metodolojisi farklı disiplinlerle iş birliği ve elde edilen ürünün sürdürülebilir olması gerekliliğinden, temelde diğer yöntemlerle benzer olsa da farklılık göstermektedir. Biomimikri metodolojisinde izlenecek adımlar “tasarım spirali” olarak isimlendirilen şemada iki farklı yöntemle açıklanmıştır (Şekil 2).

Bunlardan ilki biyolojiden tasarıma; doğada keşfedilen, tasarıma uyarlanabilecek örneklerin değerlendirilmesiyle yürüten süreçtir. İkincisi biyolojiye sorma; tasarım için aranan çözüme yönelik doğadaki örneklerin araştırılmasını sağlar. Yöntemler arasındaki en belirgin farkın, beriki yöntemde tasarımcının daha çok söz sahibi olduğu ve tasarımcının belirlediği problemin çözümüne yönelik araştırma yapılırken öncekinde belirlenen örneğin tasarıma uyarlanması olduğu göze çarpmaktadır.

Bu çalışmada biyolojiden tasarımı yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 2. Biyolojiden tasarıma metodolojisi

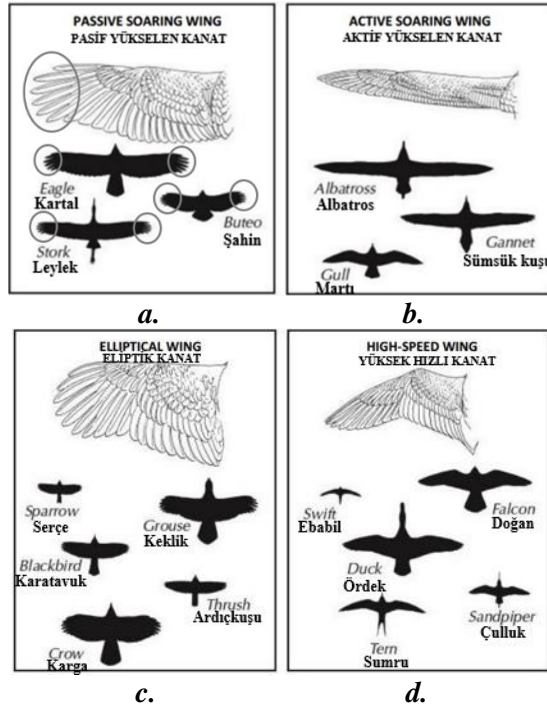
Genel hatlarıyla bu çalışmada benimsenen biyolojiden tasarıma metodolojisi uygulama süreci şu şekildedir;

**İşlevi Belirleme:** Kuşlardaki aerodinamik kanat yapısını araç üzerindeki toplam sürtünme kuvvetini en aza indirmek için tekerlekteki direnç kuvvetini azaltan enerji tasarrufu ve yüksek performans sağlayan tasarıma dahil edilmesi.

**Kapsamı tanımlama:** Binek otomobillerde toplam sürtünme kuvvetini en aza indirmek için tekerlekteki direnç kuvvetini azaltan enerji tasarrufu ve yüksek performans sağlayan jant modeli tasarım modeli kapsam olarak belirlenmiştir.

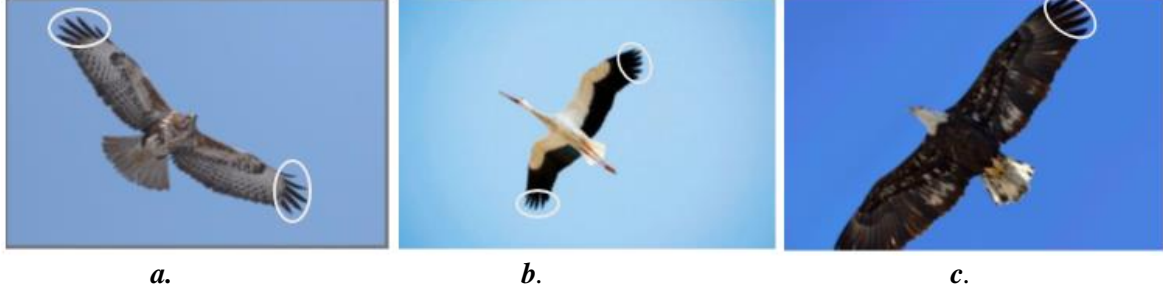
Adımlar;

1. Doğadaki modelleri keşfetme:



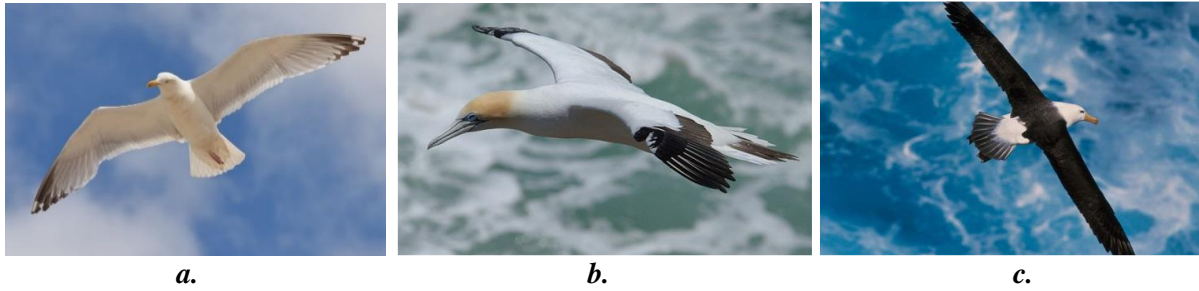
Şekil 3. Farklı türdeki kuşların kanat tipleri

Şekil 3.a’da verilen pasif yükselen kanat örneklerinde uzun birincil yayılan tüyleri (Şekil 3.a. ve Şekil 4.a-c’de işaretlenmiş bölgeler), kuşun "termal" olarak adlandırılan sıcak dikey hava sütunları yakalamasına izin verir ve havaya yükselir. Bu kanat tipine sahip kuş örnekleri arasında kartallar, şahinler ve leylekler Şekil 4.a-c’de gösterilmektedir.



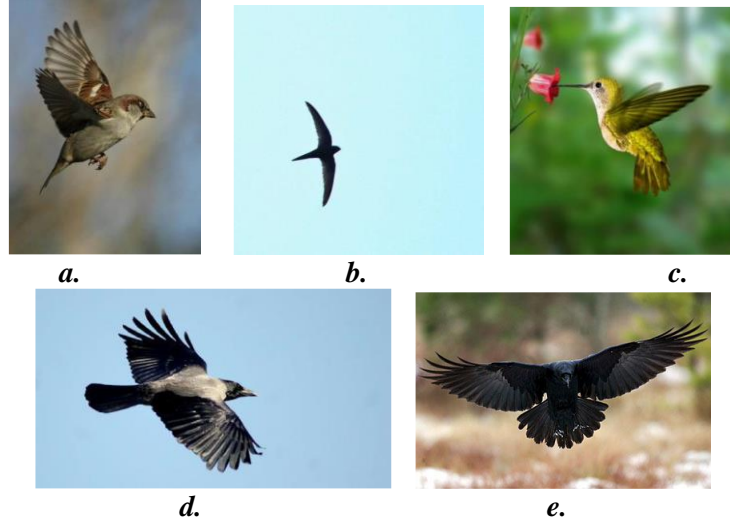
Şekil 4. Şahin, leylek ve kartal kuşları

Şekil 3.b’de şematik gösterilen aktif yükselen kanatlar uzun ve dardır. Bu takımdaki kuşların kanatları uzun süre uçmalarına veya kanat çırpmaksızın uçmalarına izin vermektedir. Ancak, bu kuşlar rüzgar akımlarına pasif yükselen kuşlardan çok daha bağımlıdır. Kuş örnekleri bu kanat tipi için albatroslar, martılar ve sümsük kuşlarıdır (Şekil 5.a-c). Laysan Albatrosu çok uzun ve dar kanatlara sahip olup yukarı-aşağı uçuş tarzıyla suya yakın uzun mesafelere gitmek için rüzgar hızındaki farklılıkları kullanarak çok fazla enerji harcamadan okyanusun üzerinde uçar.



Şekil 5. Martı, sümsük ve albatros kuşları

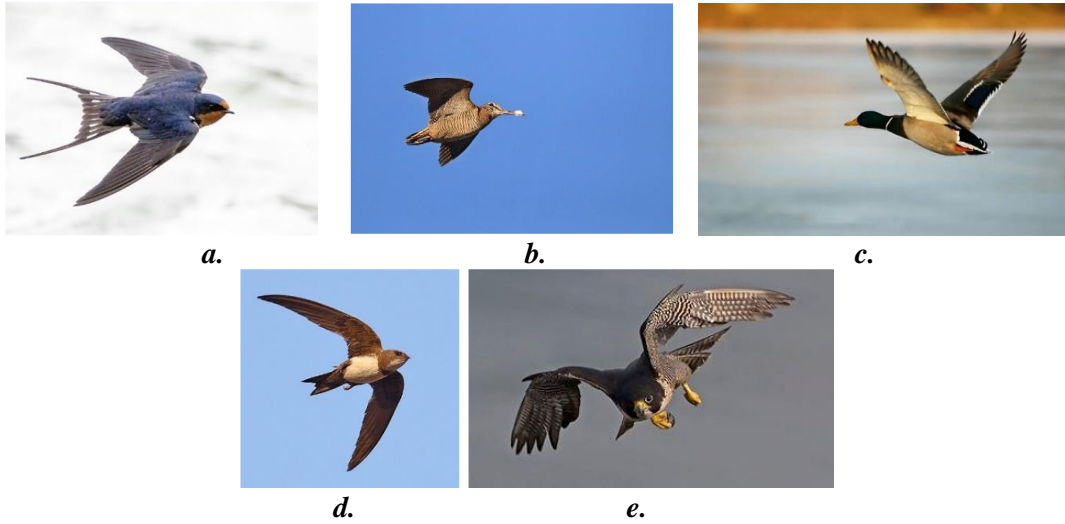
Eliptik kanatlar, yüksek hızlı kısa manevra kabiliyeti için iyidir. Kanatlar hızlı kalkışlara ve sıkı manevralara izin verir. Bu kanat tipleri yüksek hıza ulaşmayı sağlamakta ancak yapıları gereği hız uzun süreli korunamaz. Kuş örnekleri bu kanat türü için kargalar, kuzgunlar, karatavuklar, sinek kuşu ve serçelerdir (Şekil 6.a-e). Vurgulanan bu eliptik kanatlar aslında küçüktür ve kanat çırpma frekansı yüksektir. Yüksek hızlı frekansta kanat çırpma için kanat şekline göre, kuşun sinirleri ve kasları inanılmaz hızlı hareket edecek şekilde özel olarak yaratılmıştır. Örneğin Şekil 6.c’de gösterilen sinek kuşu hızlı ve güçlü kanatları sayesinde çiçekten çiçeğe gezerken ve nektarı yudumlarken yüzüyor gibi görüldüğü söylenebilir.



**Şekil 6.** Serçe, karatavuk, sinek kuşu, karga ve kuzgun

Şekil 3.d’de şematik olarak gösterilen yüksek hızlı kanatlar uzun ve incedir, ancak aktif yükselen kanatlı kuşlar ile karşılaştırıldığında daha kısa oldukları söylenebilir (Şekil 6,7.). Adından da anlaşılacağı gibi, bu kanatlı kuş tipleri 390 km/s hıza çıkabilecek kadar inanılmaz hızlıdır. Ancak eliptik kanatlı olanlardan farklı olarak, bu kuşlar daha geniş yapılı kanatlara sahip olmasından kaynaklı daha uzun bir süre hızlarını koruyabilirler.

Bu kanat tipindeki kuşlara örnek olarak; eabilgiller, ördekler, doğangiller, kırlangıçlar ve çullukgiller sayılabilir (Şekil 7.a-e) [5].



**Şekil 7.** Kırlangıç, çulluk, ördek, eabil ve gökdoğan (bayağı doğan)

## 2. Biyolojik prensipleri soyut hale getirme:

Yüksek hızlı kanat tipine sahip bilimsel adı Falco peregrinus olan gökdoğanlar, hassas manevralar yapmalarını ve çevik avı yakalamalarını sağlayan yüksek aerodinamik kuvvetler üreten kanatlara sahiptir. Avlanırken büyük yüksekliklerden ve aşırı hızlarda dalarlar. Fizik tabanlı bir bilgisayar simülasyonu kullanarak Hollanda ve İngiltere’deki araştırmacılar, onlara aşırı fiziksel ve bilişsel talepler getiren bir saldırı stratejisi geliştirdiklerini açıkladılar. Araştırma ayrıca otonom çarpma kanadı uçağı geliştirilmesine de yardımcı olabileceği belirtildi [6].

Gökdoğan, dünyanın en hızlı dalış kuşu ve gezegendeki en hızlı hayvandır. Guinness Dünya Rekorlarına göre 2005 yılında ABD, Washington, Friday Harbor kasabasında Ken Franklin'e ait adı "Korkunç" olan bir gökdoğan, yaklaşık 4,8 km yükseklikten avın peşinden alçalarak dalış yaptığı sırada 389,46 km / saat hızla hareket kaydedildi [7].

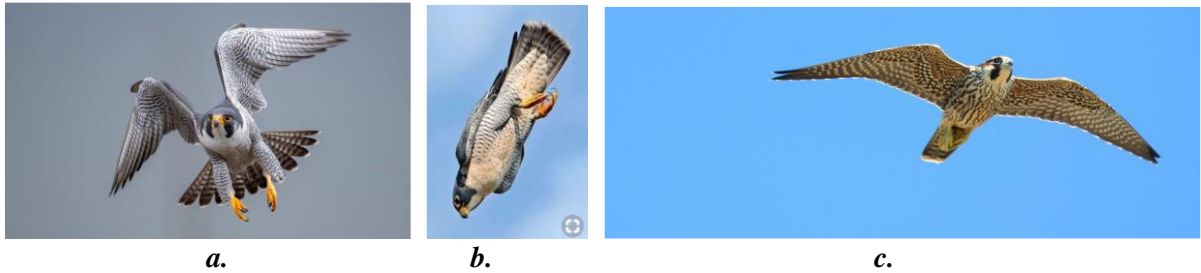
### 3. Olası uygulamaları düşünme:

Otomobil tekerleklerinde istenen önemli özellikler hız ve enerji tasarrufu olarak sınıflandırılabilir. Enerji tasarrufu bütün kuşların ortak özelliği olduğu için en hızlı kanat tipine ve özelliğine sahip olan gökdoğanların kanat yapılarının çalışılan jant tasarımı uygulamasında kullanılmasına karar verilmiştir.

### 4. Doğanın stratejisini taklit etme:

Gökdoğanların uçuş özellikleri yukarıdaki genel inceleme sonrasında daha detaylı olarak incelenmiştir. İncelemelere göre bu inanılmaz işler yapan kuş türü hızlanma esnasında kanatlarını gövdesine yaklaştırarak şeklen tek kanadıyla ters V gövdesi itibarıyla M harfi yaparak (Şekil 8.a) hızını artırmaktadır. En hızlı uçtuğu esnarlarda bir nevi kanat gövde yapısını su damlasına benzetmektedir (Şekil 8.b). Hızını koruma esnasında da alttan bakıldığında yine önden görüldüğü gibi tek kanadıyla ters V gövdesiyle M harfi şeklini almaktadır (Şekil 8.c).

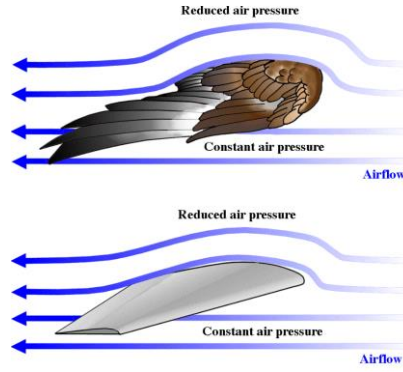
Kuşun yaptığı dikey hareket nedeniyle süpürülen bir hava hacmi vardır. Hava hacmi jant içindeki kanatların dönerek yaptığı hareket esnasında da süpürülmektedir. Bu nedenle Gökdoğan kuşunun yaptığı dikey hareketin jantın yaptığı dairesel hareketle süpürülen hava hacmi ve hava direnci açısından benzerdir. Bu gözlem jantta sabit kanat yapılı tasarım olarak düşünüldü. Kanat kesit yapısı olarak yağmur damlası baz alınması uygun görülmüştür.



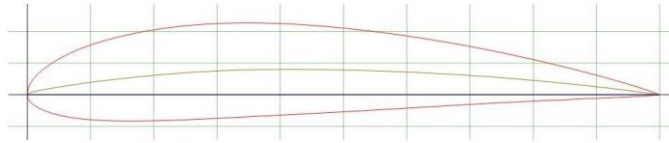
**Şekil 8.** Gökdoğan kuşunun jant tasarımına dahil edilmesi

Ponitz B., Triep M., Brücker C. (2014), yaptıkları gökdoğan kuşunun aerodinamik analiz çalışmasında bir gökdoğan kuş modelini 3d olarak simüle etmişlerdir. Model üzerinde akış analizi yapan araştırmacılar sonuçları ortaya çıkarmışlardır. ICFM CFD ve OpenFOAM yoluyla yapılan sayısal simülasyonların sonuçları, vücut yüzeyi çevresinde ve bir çift vücut girdabı ve uç girdabı gibi gökdoğan modeli için baskın akış yapılarını gösterir. Gömülü kanat profili için sürtünme, açılan kanatların konfigürasyonu ile kaldırma etkisinin artması ilişkisine göre azalır [8].

Bir başka araştırma da gökdoğanın gerçek zamanlı yüksekten dalış aerodinamiği araştırılmıştır. Araştırma deneyi için gökdoğan kuşu 60 metre yüksekliğe sahip barajdan dalış yapmak için eğitilmiştir. Deney sırasında uçuş yörüngesi kameralarla kayıt altına alınmıştır. Bu kayıttaki görüntülerle gökdoğan modeli oluşturularak rüzgar tüneline akış analizi yapılmıştır. Sonuçlar 3d simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Kayıt görüntülerine göre dalış esnasında tüylerin açıldığı gözlemlenmiş modeldeki eşdeğer bölgelerde akış ayrılmasını olduğu ortaya çıkmış ve kuşun dalış esnasında yağmur damlasına benzer bir profilde seyrettiği gözlemlenmiştir (Şekil 9) [9].



**Şekil 9.** Gökdoğanın dalış esnasında girdiği yağmur damlası formu



**Şekil 10.** NACA 4415 Yağmur damlası profili [10]

Bu çalışmada yukarıda bahsedildiği üzere kanat yapısı olarak gökdoğan kuşu kanadından esinlenilirken, kanat kesit yapısı olarak da en mükemmel yapıya sahip yağmur damlasından esinlenilmiştir.

#### Yağmur damlası kanat tasarımı

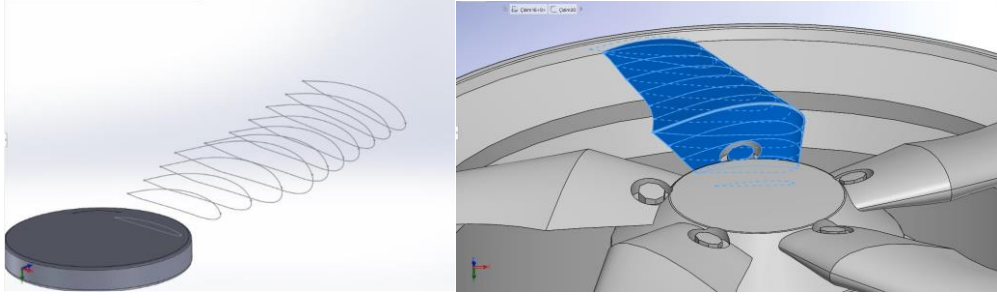
Minimum Sürtünme, Maximum Hızlanma, Maximum Enerji Tasarrufu, Minimum Enerji Sarfıyatı, Maximum Güç Eldesi gibi nedenlerden dolayı aerodinamik tasarımlarda kullanılan en önemli profildir (Şekil 9,10). Bu etkenleri önemseyen bir tasarımcı yağmur damlası profilini kullanmak zorundadır.

#### 5. Yaşamın ilkelerini değerlendirme:

Her ne kadar bu aşamaya kadar yapılan incelemeler neticesinde doğadan esinlenilecek yapının tasarıma yenilikçi çözüm sunduğu sonucuna varılmış olsa da bu çözümün mühendislik hesaplamaları ile analizi yapılmadan kesin sonuç ifadeleri söylenemez. Çözüm olarak sunulan tasarım şeklinin araç aerodinamiğine etkisinin olacağı ve jant yapısında görsel olarak da değişimde bulunacağı yadsınamaz. Bu bağlamda biyomimetik yaklaşımla yapılan otomobil jant tasarımı ve analizlerine ilişkin yapılan detay çalışmalar sonraki bölümlerde verilmektedir.

### **2.2. Jant Tasarımı (Rim Design)**

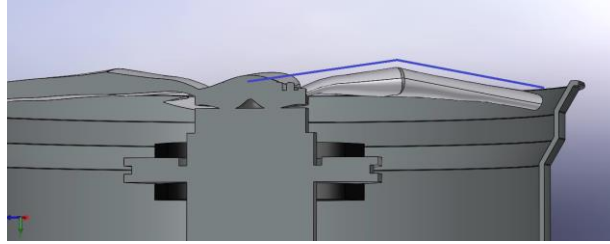
Farklı yapılarda jantlar mevcut olmakla birlikte bu jantlar farklı amaçlarla kullanılmak istenebilir. Rüzgar direncine karşı yakıt tasarrufu sağlamak amacıyla araçlarda aerodinamiği uygun hale getirmek istenmektedir. Jant, gövde ve kanatlardan oluşmaktadır. Jant gövdesi akslara jant kanatları da lastiğe bağlıdır. Tekerlek, gövde eksenli döndüğü için jant gövdesinin süpürdüğü bir hava hacmi yoktur. Ancak jant kanatları aralarındaki boşluk sebebiyle içerisine hava giriş çıkışı olmakta ve hareket halinde bu hava kanatlara direnç oluşturmaktadır. Bu direnç uygun kanat tasarımıyla en aza indirgenebilir. Çalışmada jant kanat sayısı olarak piyasada en çok tercih edilen model olan 5 kanatlı model seçildi. Bu çalışmada sadece janttan kaynaklanan aerodinamik yapıya etkiyen direnç kuvvetleri indirgemek hedeflenmiştir.



**Şekil 11.** Tasarlanan kanadın kesit yapısı

Araştırmaların hiçbiri doğadan esinlenerek yapılmamış genellikle deneme yanılma veya yapıları geliştirme yoluyla yapılmışlardır. Yapılan literatür taramasına göre biyomimetik bilimi jant aerodinamiği konusunda kullanılmamıştır. Bu nedenlerden dolayı tasarım, mükemmel özelliklerde yaratılan canlılarda aranmış ve çalışmaya uyarlanmıştır.

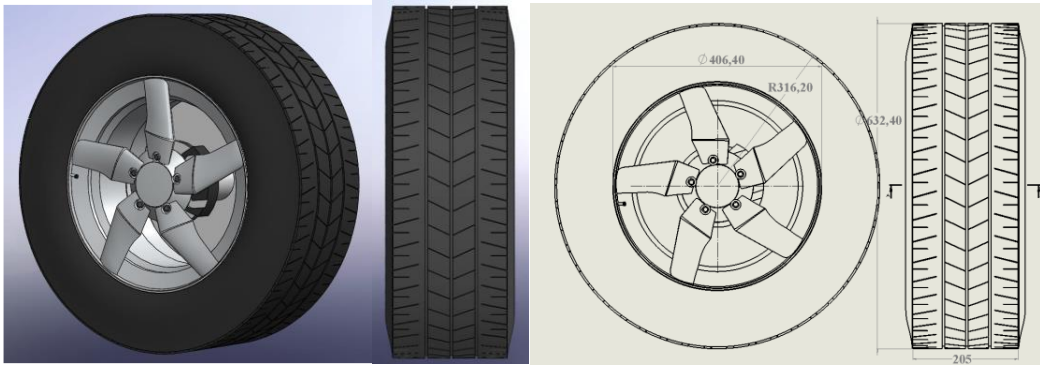
Fotoğraflarda da görüldüğü gibi kuşlar hızlı uçmak istediklerinde süzülürken kanatlarını ters V şeklinde hafif bükerek. Bu akan havanın kanatlarına temas yüzeyini azaltıp en ekonomik uçuşu sağlamakla birlikte gövdelerinden kanat uçlarına doğru hava akış hızını artırmaktadır.



**Şekil 12.** Tasarlanan kanat yapısının dönüş yönüne göre ön kesit görünüşü (Mavi çizgi ters V şeklinde olduğunu gösterir)

Tasarlanan kanat yapısal olarak gökdoğan kuşundan esinlenilmiştir. Buna göre kanadın dönme yönüne göre ön kesit görünüşü Şekil 12.'de gösterilmiştir. Aynı kuşlar gibi ters V kanat şekli verilmiştir.

Gökdoğan kuşundan ilham alınan kanat tasarımı yağmur damlası kanat kesit şekliyle oluşturuldu. Tasarımda 205/55 R16'lık birebir jant ölçüleri kullanılmıştır. Tasarım çalışmaları Solidworks programında gerçekleştirilmiştir. Bu jant seçiminin metrik birimdeki ölçüleri şunlardır; taban genişliği: 205 mm, yanak yüksekliği (lastik yanak yüksekliğinin taban genişliğine oranı): %55/113 mm, jant çapı: 406 mm, tekerlek çapı: 632 mm'dir.



**Şekil 13.** Biyomimetik yaklaşımla elde edilen tasarımın görünüşleri

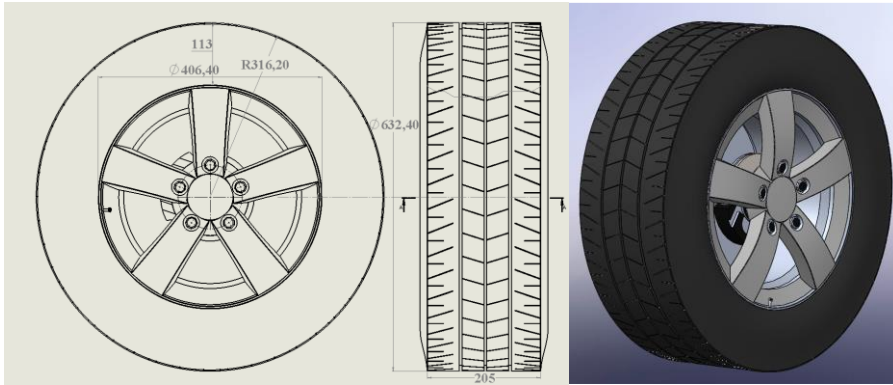
Görsellerde görüldüğü gibi jant tasarımı ön görünüşten gözükmemekte ve lastik kaplamasının iç tarafında yer almaktadır.

### 2.3. Tasarımın Akış Analizi (Flow Analysis of Design)

Bu bölümde Solidworks programının Akış analizi modülü kullanılmış ve analiz için bir rüzgar tüneli modellenmiştir. Jant dönüşü için tekerlek ebatından biraz büyük dönüş hacmi oluşturuldu. Daha sonra model sonlu elemanlara ayrılarak ağ yapısı oluşturuldu (MESH). Bilgisayarda analiz yapılacak hacimler belirlenmiştir. Sonrasında çözümleme için gerekli sınır şartları tayin edilmiş ve otomatik belirlenen iterasyon sayısında çözüm yapılmıştır.

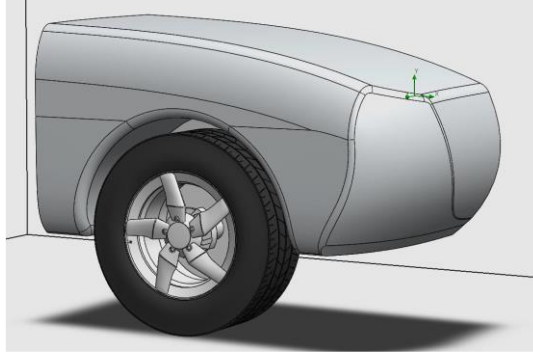
Analiz için tasarlanan jantla birlikte yine aynı ebatlara sahip standart bir jant modeli tasarlandı. Bu iki jant modelinin analizlerini kıyaslayarak tasarımın olumlu taraflarını gözlemleme imkanı bulunmuş oldu.

Seçilen jant modeli Honda Civic 1.6 i-VTEC Elegance aracının 2007-2011 yıllarındaki kasasına ait orijinal jantıdır. Bu jant modeli standart bir tasarım yapısına sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir.



**Şekil 14.** Seçilen jant modelinin teknik ölçüleri ve 3 boyutlu görünümü

Şekil 14’de seçilen jantın Solidworks 2016 programında modellenen katı görüntüleri gösterilmektedir. Bu jantın kanatları ve bijon delikleri haricinde bütün tasarımı biyomimetik bilimi ile tasarlanan jant ile aynıdır.

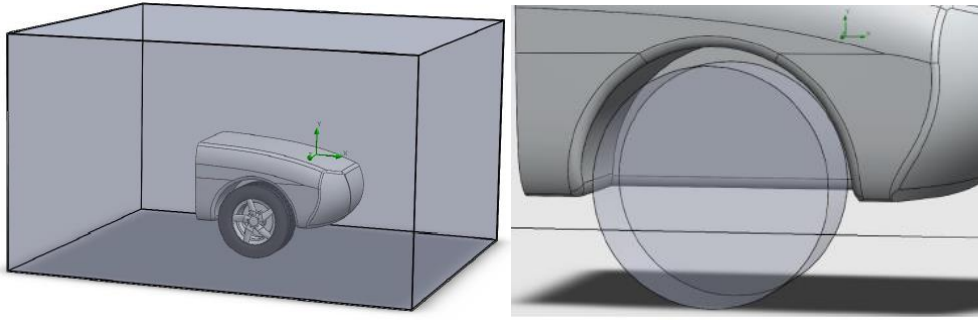


**Şekil 15.** Analizin gerçekçi sonuç elde etmesi için tasarlanan çamurluk

Araç tekerleği üzerindeki çamurluk tekerleğe çarpan havanın bir kısmını dağıtır. Bu yüzden yalnız tekerleğin değil çamurluklu modelle analizin yapılp sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. Çamurluk gerçek araç boyutları göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Tekerleğin binek araçlarda kullanılması yönünde inceleme yapıldığı için çamurluk etkisi de analize dahil edilmiştir.

Analiz kafes yapısı oluşturulup analiz bu kafes içinde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem analizin daha kısa sürede sonuçlanmasını sağlamaktadır. Kafes 2000 mm yüksekliğinde 3000 mm genişliğinde 7000 mm derinliğinde modellenmiştir (Şekil 16.a).





a. Analiz kafesi

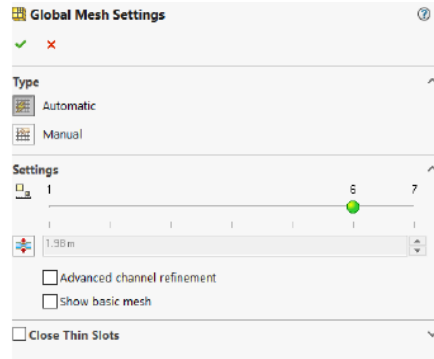
b. Jant hareketinin gerçekleştiği analiz silindiri

**Şekil 16.** Akış analizi için oluşturulan sınır şartları

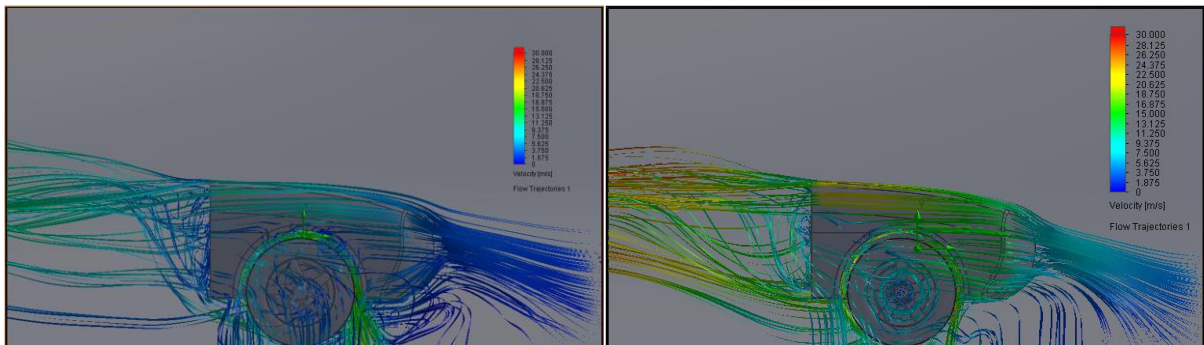
Programda kullanılacak kendi eksenindeki jant hareketinin analizinin yapılacağı silindir 633 mm çapında ve 250 mm genişliğinde modellenmiştir (Şekil 16.b).

Analiz parametreleri olarak akışkan cinsi hava seçilmiştir. 1 atm çevresel basınçta 20 °C sıcaklıkta, rüzgar hızı olarak araç 120 km/h hızla giderken maruz kaldığı rüzgar hızı olan 120 km/h' a denk gelen 33 m/s' lik hız kullanılmıştır. Tekerlek hızı aracın saatte 120 km yol almasına denk gelen 110 rad/s' lik dönüş hızı kullanılmıştır. Ayrıca tekerlek zemin üzerine yerleştirilerek yol etkisi de analize dahil edilmiştir.

Mesh (ağ örgüsü) ayarı 7 seviye üzerinden 6. seviyede ayarlanarak sonuçlar elde edilmiştir Ağ yapısı otomatik program tarafından oluşturulmuştur (Şekil 17).

**Şekil 17.** Akış analizi için mesh (ağ örgüsü) ayarı

## 2.4. Jantın Akış Analizi ( Rim Flow Analysis)



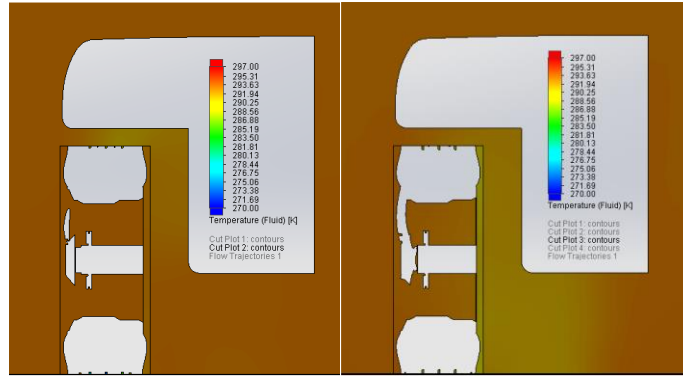
a. Tasarlanan jant

b. Standart jant

**Şekil 18.** Tasarlanan janta ve standart janta etkileyen hava akış vektörel dağılımı

Girilen parametre ve tasarım girdilerine göre montaj formatında akış analizi yapılmıştır (Şekil 18.a-b). Tasarlanan jantta akış zemine paralel bir açıyla modelden ayrılmakta ve laminer akış şekline benzemektedir. Akış hızının modele çarpıp çıkmasından sonra hafif düzeyde arttığı görülmektedir. Özellikle jantın 110 rad/sn'lik hareketinden dolayı lastikten akslara ve çamurluk bağlantısına uzanan kısımda akışkanın daha da hızlandığı görülmektedir.

Standart janta uygulanan hava akışının tasarımdaki akış şekline benzer bir davranış göstermektedir. Akış zemine paralel bir açıyla modelden ayrılmakta ve laminer akış şekline benzemektedir. Akış hızının modele çarpıp çıkmasından sonra tasarlanan janta göre daha hızlı düzeyde arttığı görülmektedir. Özellikle jantın 110 rad/sn'lik hareketinden dolayı jant göbeğinden lastik çevresine ve çamurluk bağlantısına uzanan kısımda akışkanın daha da hızlandığı görülmektedir.

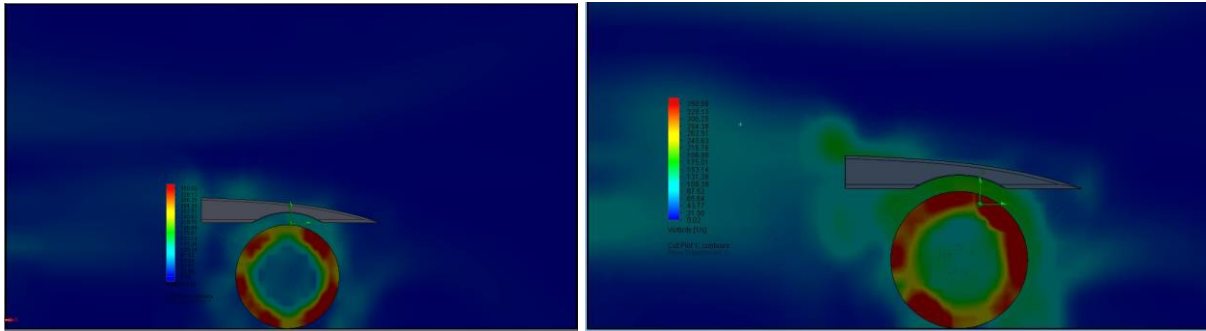


*a. Tasarlanan jant*

*b. Standart jant*

**Şekil 19.** *Tasarlanan janta ve standart janta etkiyen akışın jant merkez kesitinden sıcaklık dağılımı*

Şekil 19'da tasarlanan jantın lastik bölümünün çamurlukla arada kalan kısmında akışta sıcaklık düşüşü olduğu, diğer jantta ise jantın arka kısmının ve çamurluk taban kısmında sıcaklık düşüşü olduğu görülmüştür. Aynı zamanda diğer jantın jant yuvasında akışta sıcaklık düşüşü olduğu görülmektedir. Bu azalma jantın dış yüzeyindeki akış ısısının azalmasından kaynaklanmaktadır.



*a. Tasarlanan jant*

*b. Standart jant*

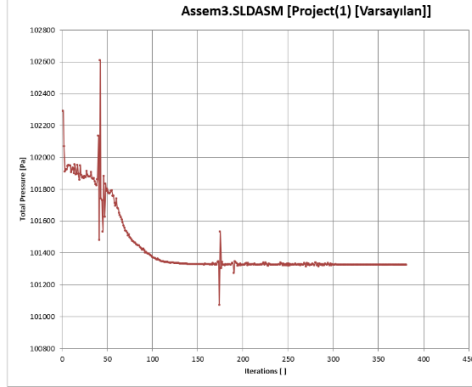
**Şekil 20.** *Tasarlanan jant ile standart janttaki vorticity dağılımı*

Şekil 20'de iki jantında girdap oluşumu gösterilmiştir. Bu görsellere göre tasarlanan jantta diğer janta oranla daha az girdap oluştuğu, lastik dış kısımlarında iki jantın birbirine yakın girdaplık gösterdiği ve diğer jant görselinde lastik çevresi ve arkaya doğru uzanan girdap davranışı görselleştirilmiştir.

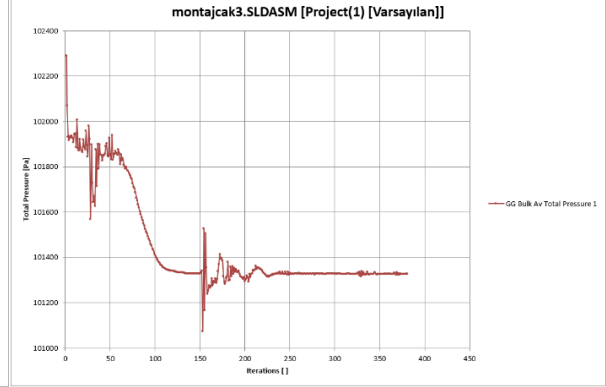
### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

**Tablo 2.** Tasarlanan jantın ve standart jantın bulunduğu modellerde oluşan toplam basınç kuvveti dağılımları

#### a. Tasarlanan jant



#### b. Standart jant



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
a. GG Bulk Av Total Pressure 1	[Pa]	101325,4437	101325,6113	101325,3857	101325,978	100	Yes	0,592293185	36,48135054

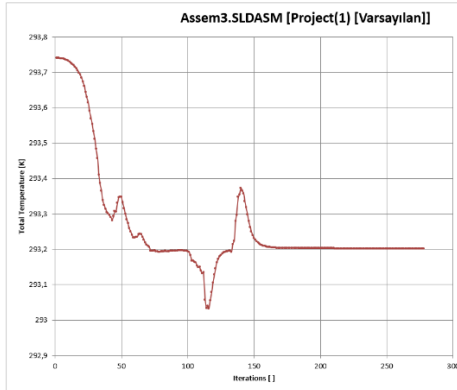
Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
b. GG Bulk Av Total Pressure 1	[Pa]	101327,1071	101327,243	101323,444	101335,8242	100	Yes	0,888673435	16,665694

Tasarlanan jantın bulunduğu modelin basınç değişimi grafiği Tablo 2.b’de gösterilmiştir. Ortalama olarak 381 iterasyon değerinde 101325,6113 Pa değer elde edilmiştir.

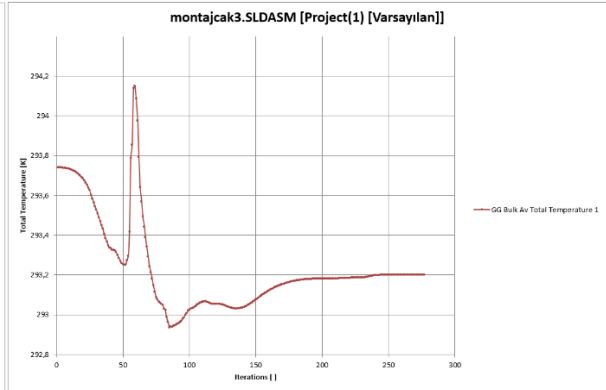
Standart jantın bulunduğu modelin basınç değişimi grafiği Tablo 2.b’de gösterilmiştir. Ortalama olarak 381 iterasyon değerinde 101327,243 Pa değer elde edilmiştir. Bu değerlere göre standart janta oranla tasarlanan jantın bulunduğu modelin toplam basıncı % 0,00161’lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş ihmal edilebilir bir değer olduğu için iki modelin toplam basıncının birbirine eşit olduğu kabul edilebilir.

**Tablo 3.** Tasarlanan jantın ve standart jantın bulunduğu modellerde oluşan toplam sıcaklık değişimi dağılımları

#### a. Tasarlanan jant



#### b. Standart jant



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
a. GG Bulk Av Total Temperature 1	[K]	293,2019655	293,2015058	293,1995596	293,2021051	100	Yes	0,002545499	0,027279402

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
b. GG Bulk Av Total Temperature 1	[K]	293,2020039	293,2022892	293,2020039	293,2024337	100	Yes	8,18798E-05	0,015911126

Tasarlanan jantın bulunduğu modelin sıcaklık değişimi grafiği Tablo 3.a’da gösterilmiştir. Ortalama olarak 278 iterasyon değerinde 293,2020039 Kelvin değer elde edilmiştir.

Standart jantın bulunduğu modelin sıcaklık değişimi grafiği Tablo 3.b’de gösterilmiştir. Ortalama olarak 278 iterasyon değerinde 293,2015058 Kelvin değer elde edilmiştir. Bu değerlere göre standart janta oranla

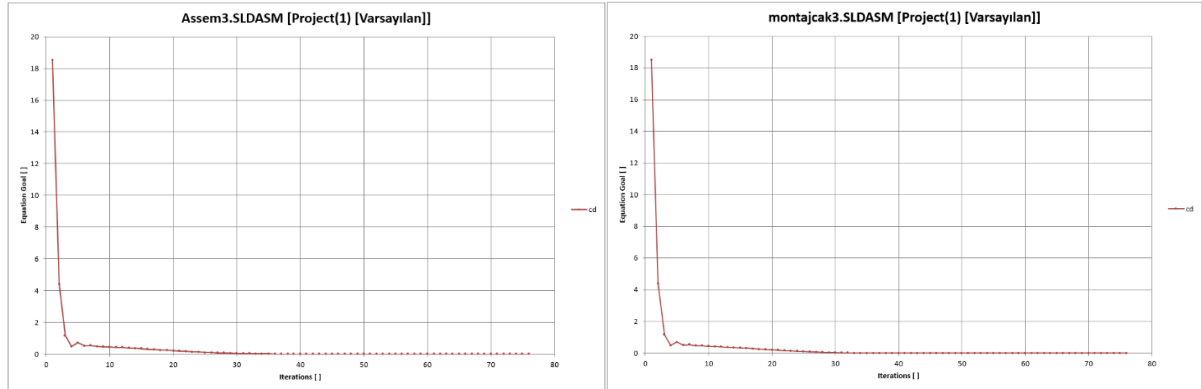
tasarlanan jantın bulunduğu modelin toplam sıcaklığında % 0,00016988316'lık bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış ihmal edilebilir bir değer olduğu için iki modelin toplam sıcaklığı birbirine eşit kabul edilebilir.

Janta dönme hareketi verilmeden belirtilen analiz parametrelerine göre yapılan analizde hesaplanan Cd (sürüklenme katsayısı) değeri Tablo 4.a-b' de gösterilmiştir.

**Tablo 4.** *Tasarlanan jantın ve standart jantın bulunduğu modellerin analizdeki sürüklenme katsayısı grafikleri*

**a. Tasarlanan jant**

**b. Standart jant**



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	0,049416614	0,087252906	0,049416614	0,144890329	100	Yes	0,095473715	13,56963402
cd	[ ]	0,000126878	0,000224024	0,000126878	0,000372009	100	Yes	0,000245131	0,034840298

**a.**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	0,057313417	0,084041022	0,051803493	0,127969516	100	Yes	0,076166023	13,56973387
cd	[ ]	0,000147153	0,000215777	0,000133006	0,000328564	100	Yes	0,000195558	0,034840554

**b.**

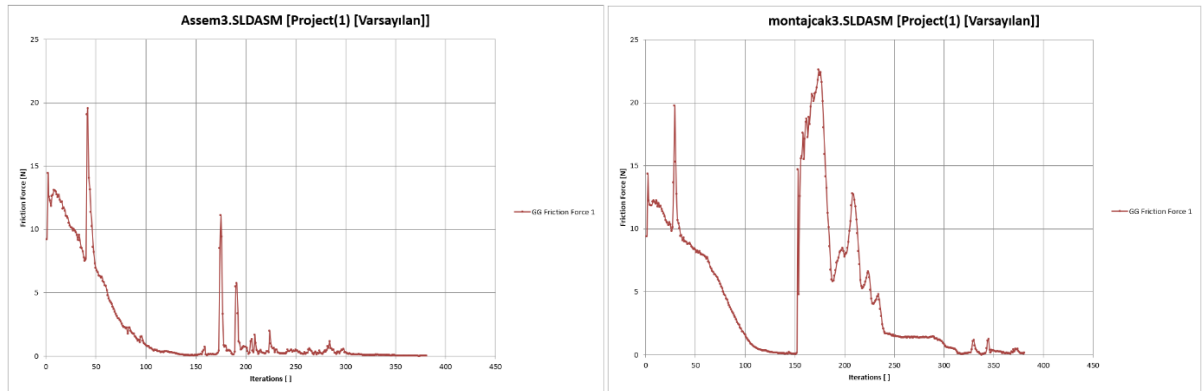
Biyomimetik olarak tasarlanan jantın bulunduğu modelin Cd katsayısı ortalama değer olarak 76 iterasyon değerinde 0,000224024 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.a).

Standart jantın bulunduğu modelin Cd katsayısı ortalama değer olarak 76 iterasyon değerinde 0,000215777 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.b). Bu sonuçlara göre tasarlanan jantın durgun şartlarda Cd katsayısı standart janta oranla % 3,822 oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Durgun halde standart jantın tasarlanan janta göre sürüklenme direnci ve aerodinamik yapısının daha düşük olduğu anlaşılmıştır.

**Tablo 5.** *Tasarlanan jantın ve standart jantın bulunduğu modellerin analizdeki sürtünme kuvveti grafikleri*

**a. Tasarlanan jant**

**b. Standart jant**



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Friction Force 1	[N]	0,021430248	0,046746459	0,014302744	0,102176387	100	Yes	0,087873643	0,553313622

**a.**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Friction Force 1	[N]	0,163122671	0,259107818	0,01580639	1,247415348	100	Yes	0,367751359	0,530399005

**b.**

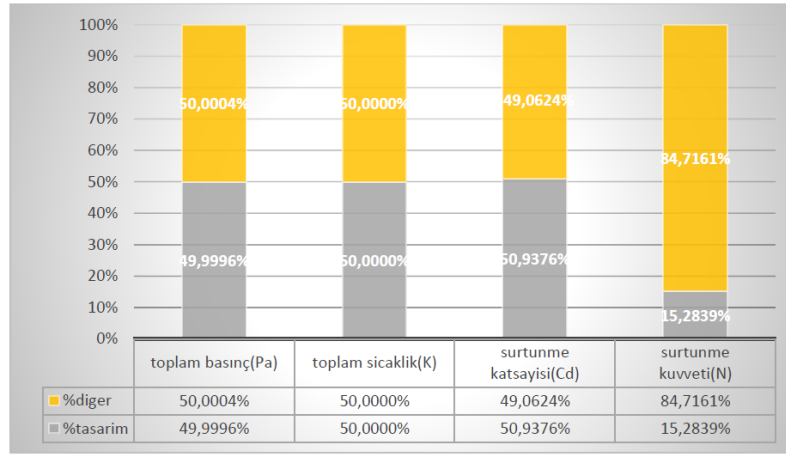
110 rad/sn'lik dönüş hızı verilerek yol şartları dikkate alınarak yapılan analizde sürtünme kuvvetleri değişimi Tablo 5.a-b' de gösterilmiştir.

Tablo 5.a'da tasarlanan jantın analiz sonucunda ortaya çıkan sürtünme kuvveti 381 iterasyon hesabında 0,046746459 N olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.b'de standart jantın analiz sonucunda ortaya çıkan sürtünme kuvveti 381 iterasyon hesabında 0,259107818 N olarak hesaplanmıştır.

Gökdoğan kuşundan kanat şekli, yağmur damlasından kesit yüzeyi alınarak tasarlanan jantın standart bir janta oranla analiz parametrelerine göre uğradığı sürtünme kuvvetinde % 81,9586 oranında kazanç olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çamurluklu yapılan analiz karşılaştırmasına göre biyomimetik yaklaşımla tasarlanan jant modeli diğer modele göre toplam basınç ve sıcaklıkta eşit, durgun haldeki sürtünme katsayısında fazla ve sürtünme kuvvetinde düşük olduğu ortaya çıkmıştır (Tablo 6).

**Tablo 6.** Yapılan akış analizinin tasarlanan jant ile diğer jant arasındaki toplam basınç, toplam sıcaklık, sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti üzerinden yüzdeler dağılımı



Sonuç olarak tespit edilen bilgiler şunlardır;

110 rad/sn 'lik dönme hareketinde ölçülen toplam sıcaklığın tasarlanan jantta diğer janta nazaran etkisi fazla olmamıştır.

110 rad/sn 'lik dönme hareketinde ölçülen toplam basıncın tasarlanan jantta diğer janta nazaran etkisi fazla olmamıştır.

Durgun haldeki analizi yapılan biyomimetik yaklaşımla tasarlanan jantın bulunduğu modelin diğer jantın bulunduğu modele oranla cd katsayısı dağılımında artış gösterdiği ortaya çıkmıştır.

110 rad/sn 'lik dönme hareketinde ölçülen sürtünme kuvveti dağılımı olarak diğer jantın bulunduğu modele oranla tasarlanan jantın bulunduğu modelin sürtünme kuvveti dağılımının azaldığı gözlemlenmiştir.

Durgun hale tasarlanan jantın Cd katsayısı daha fazla olmasına rağmen bilinenin aksine uğradığı sürtünme kuvveti daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar gösteriyor ki Cd katsayısı yalnızca durgun haldeki cisimlerin direnç özelliklerini göstermektedir. Yüzeyinde bulunan hareketli parçaları bulunan, ortamdan etkilenen veya temas halinde olan cisimlerin aerodinamik özellikleri belirlenirken bu parçaların da dikkate alınması elzem olduğu anlaşılmıştır.

Bu analizler gökdoğan kuşunun havada süzülerek yaptığı kanat hareketlerinden esinlenerek yapılan tasarımın hava direncini azalttığını, janta aerodinamik açıdan olumlu yönde etki ettiğini göstermektedir. Havanın jant üzerinde oluşturduğu bu direnç kuvvetinin azaltılması aracın yakıt ekonomisini artıracaktır.







**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)**

Çalışma boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR, Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK ve Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ'a teşekkür ederim.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Demir, M. T. (2020). Aerodynamic Wing Design With Biomimetic Approach and A Practice. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 7(1), 11-20.
- [2] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı (2007). *MEGEP-Motorlu Araçlar Teknolojisi Gövde Mekaniği-1*. Ankara: MEB Yayınevi.
- [3] Vdovin, A. (2013). *Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars*, Thesis For The Degree of Licentiate, Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology, Sweden, 3-27.
- [4] Yıldız, H. (2012). *Endüstri Ürünleri Tasarımı Kapsamında Biyomimetik Tasarımın Yeri ve Metodolojisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Ürünleri Tasarımı Anabilim Dalı, İstanbul, 41-59.
- [5] Thompson, M. (2019). *Ruby's Birds -Birds and their Wing Shapes*. New York: The Cornell Lab of Ornithology, 1-36.
- [6] İnternet: Allen, M. (2018, April). Falcon's high-speed dive generates forces needed to catch agile prey. *Physics World*. Web: <https://physicsworld.com/a/falcons-high-speed-dive-generates-forces-needed-to-catch-agile-prey/> adresinden 20 Mart 2020'de alınmıştır.
- [7] İnternet: Fastest bird (diving). (2005). *Guinness World Records*. Web: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/70929-fastest-bird-diving> adresinden 21 Mart 2020'de alınmıştır.
- [8] Ponitz, B., Triep, T., Brücker, C. (2014, December). Aerodynamics of the Cupped Wings during Peregrine Falcon's Diving Flight, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 4, 363-372.
- [9] Ponitz, B., Schmitz, A., Fischer, D., Bleckmann, H., and Brücker, C. (2014, February). Diving-Flight Aerodynamics of a Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*), *Plos one*, 9(2), 1-13.
- [10] Salleh, H., Sahrin, S. B., Azmi, M.H.B., and Khan, S.A. (2018, September). Fluidstructure interactions of variable span wings in low Reynold flows, *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.29), 381-385.

## The Effect of Double Strain Aging on the Mechanical Properties of DP600 Steel

Mustafa Can Topbaşoğlu<sup>1</sup>  Sırma Dinler<sup>1</sup>  Özlem Kaya<sup>1</sup>  Onur Çavuşoğlu<sup>2</sup>  Onur Altuntaş<sup>3,\*</sup>  Ahmet Güral<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. İmalat Müh. Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 11/09/2020

Revision: 05/10/2020

Accepted: 23/10/2020

#### Highlights

- Double Strain Aging

#### Keywords

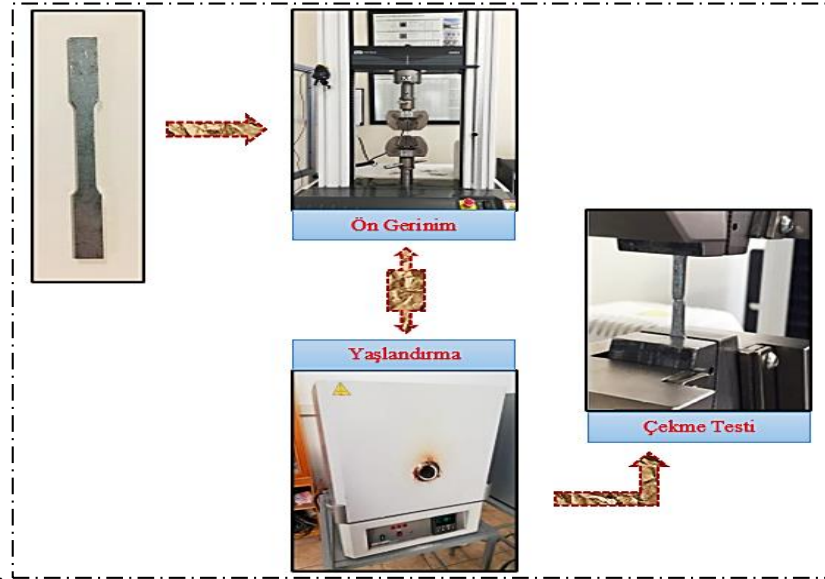
Static Strain Aging

Dual Phase Steel

Tensile Properties

Hardness

In this study, the effect of double strain aging behavior in DP600 steels was investigated. After strain aging in DP600 steels; microstructure, hardness, fractured surface and tensile properties were investigated



**Figure A.** Schematic representation of the strain aging process

**Purpose:** The aim of this study is to investigate the effect of double strain aging behavior on mechanical properties in commercial DP600 steels.







**Theory and Methods:** Specimens with single strain aging were statically aged for 30 and 60 minutes at temperatures of 140 °C and 190 °C after 2% prestrain. As a result of aging at 140 °C for 60 minutes, continuous yield behavior has been preserved, but discontinuous yield behavior has been observed at 190 °C. After aging the samples with 2% pre-strain for 30 minutes at 140 °C and 190 °C, second strain for 3% was applied and re-aging was performed at the same temperatures.

**Results:** While yield and tensile strength, hardness increased, uniform elongation and strain hardening exponent decreased at all temperatures. Continuous yield behavior was observed after 30 minutes at both ageing temperatures. It was determined that the yield and tensile strength and hardness of 30 minutes aged samples were higher than the 60 minutes aged sample, but the elongation (%) and strain hardening exponent values decreased.

**Conclusion:** Studies have shown that the results of double strain aging behavior at DP600 steels are compatible the mechanical tests.



## DP600 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Çift Gerinim Yaşlanma İşleminin Etkisi

Mustafa Can Topbaşıoğlu<sup>1</sup>  Sırma Dinler<sup>1</sup>  Özlem Kaya<sup>1</sup>  Onur Çavuşıoğlu<sup>2</sup>  Onur Altuntaş<sup>3,\*</sup>  Ahmet Güral<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. İmalat Müh. Bölümü,, Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada tek ve çift statik gerinim yaşlandırma işlemi uygulanan ticari DP600 çeliklerin çekme davranışı incelenmiştir. Tek statik gerinim yaşlandırması uygulanan numuneler %2 ön gerinimin ardından 140 °C ve 190 °C sıcaklıklarda 30 ve 60 dakika sürede statik yaşlandırılmışlardır. 140 °C'de 60 dakika yaşlandırma sonucunda sürekli akma davranışı korunurken 190 °C'de süreksiz akma davranışı görülmeye başlanmıştır. Bütün sıcaklıklarda akma ve çekme dayanımı, sertlik artarken, homojen uzama ve pekleşme üssü azalmıştır. Her iki sıcaklıktaki 30 dakikalık yaşlandırma sonrasında sürekli akma davranışı gözlemlenmiştir. 30 dakikalık yaşlandırma sonrası akma ve çekme dayanımı ile sertliğin 60 dakikalık numuneye göre yüksek olduğu ancak % uzama ve pekleşme üssü değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Daha sonra %2 ön gerinim uygulanan numunelerin 140 °C ve 190 °C sıcaklıklarda 30 dakika yaşlandırma işleminin ardından %3 ikinci gerinim uygulanmış ve aynı sıcaklıklarda tekrar yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Benzer şekilde birinci ön gerinim yaşlandırma işlemlerinde olduğu gibi akma gerilmesinin, çekme gerilmesinin ve sertliğin daha da arttığı, homojen uzama ve pekleşme üssü değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

### The Effect of Double Strain Aging on the Mechanical Properties of DP600 Steel

#### Abstract

In this study, the tensile behavior of commercial DP600 steels with single and double static strain aging was investigated. Samples with single strain aging were statically aged for 30 and 60 minutes at temperatures of 140 °C and 190 °C after 2% prestrain. As a result of aging at 140 °C for 60 minutes, continuous yield behavior has been preserved, but discontinuous yield behavior has been observed at 190 °C. While yield and tensile strength, hardness increased, uniform elongation and strain hardening exponent decreased at all temperatures. Continuous yield behavior was observed after 30 minutes at both ageing temperatures. It was determined that the yield and tensile strength and hardness of 30 minutes aged samples were higher than the 60 minutes aged sample, but the elongation (%) and strain hardening exponent values decreased. After aging the samples with 2% pre-strain for 30 minutes at 140 °C and 190 °C, second strain for 3% was applied and re-aging was performed at the same temperatures. Similarly, it was determined that the yield stress, tensile stress and hardness increased, but uniform elongation and strain hardening exponent values decreased as in the first pre-strain aging processes.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 11/09/2020  
Düzeltilme: 05/10/2020  
Kabul: 23/10/2020

#### Anahtar Kelimeler

Statik Gerinim Yaşlanması  
Çift Fazlı Çelik  
Çekme Özellikleri  
Sertlik

#### Keywords

Static Strain Aging  
Dual Phase Steel  
Tensile Properties  
Hardness

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde otomotiv endüstrisinin en büyük sorunu yüksek yakıt tüketimi ve dolayısıyla CO<sub>2</sub> emisyonudur. Bunun için araçların ağırlığı azaltılmak istenmektedir [1]. Çift fazlı çelikler uzun yıllardır bu durumu karşılamaktadır. DP çelikleri yumuşak ferrit matris içinde % 20-30 oranında dağılmış sert martensit partiküllerinden oluşan bir tür gelişmiş düşük alaşımlı yüksek dayanımlı çeliktir. Bu mikroyapı, Ac1 ile Ac3 sıcaklıkları arasından su verilerek üretilmektedir. DP çeliklerinin temel özellikleri yüksek çekme, düşük akma gerilmesi, yüksek şekillendirilebilirlik ve sürekli akma davranışı göstermesi şeklinde



sıralanabilir [2-4]. Bahsedilen tüm bu özellikler, sahip oldukları martenzit parçacık hacim oranı ve morfolojisi ile doğrudan etkilenmektedir. Alaneme [5], ısı işlem parametrelerinin mikroyapı düzeni üzerine önemli etkileri olduğunu belirtmiştir. Dolayısı ile çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri için ısı işlem parametreleri çok önemlidir. Çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri başta; martenzitin hacim oranı ve morfolojisi [6], yeni ferrit içeriği [4], ferrit tane boyutundan önemli ölçüde etkilenmektedir [7].

Palkowski [8], çift fazlı çeliklerinin fırında sertleşme davranışı gösterdiğini bildirmektedir. Ön gerinim sonrası tavlama yapılarak çift fazlı çeliğin akma gerilmesinin artırıldığı görülmektedir. Bu durum, alaşımın yaşlanması ile açıklanabilir. Waterschoot [9], çift fazlı çeliklerde deformasyon yaşlanması sırasında mukavemetlenmeyi Cottrell atmosferinin oluşum aşaması, martenzit fazının katkısından kaynaklı çökeltme ve mukavemetlenme olarak 3 aşamalı süreç olarak açıklamıştır. Gündüz vd. [10] yaptıkları çalışmada, çift fazlı çeliklerin farklı sıcaklıklarda yaşlandırılmaları sonrası mekanik özelliklerini incelemiştir. Akma ve çekme değerlerinin 200 °C yaşlanma sıcaklığına kadar arttığını, bu değerlerin 250 °C'de yaşlanma sıcaklığının ile azaldığını belirtmiştir. Gündüz'ün [11] başka bir çalışmada, yaşlanma sıcaklıklarının 150 °C, 200 °C ve 250 °C'ye artırılması sonrası akma dayanımında azalma, düzgün uzamada artışa neden olduğu belirtilmiştir.

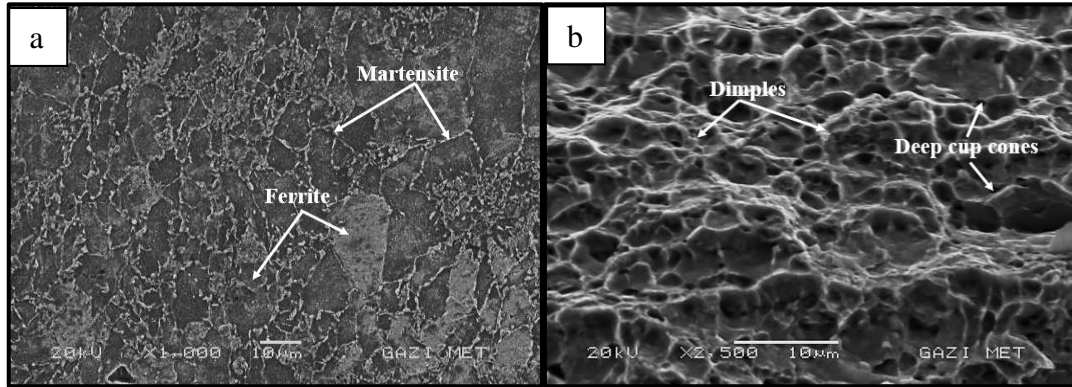
Bu çalışmada ise, ticari adı DP600 olarak bilinen çift fazlı çeliklerin önceki yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak çift statik gerinim yaşlandırmasının etkisi araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada kullanılan ticari DP600 çift fazlı çeliğinin kimyasal bileşimi ile orijinal mikroyapı ve kırık yüzey görüntüsü Tablo 1 ve Şekil 1 (a-b)'de sırasıyla verilmiştir.

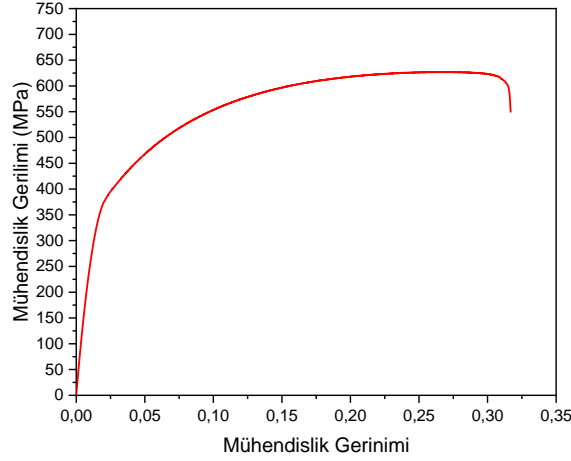
**Tablo 1.** DP600 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ. %)

Çelik Sınıfı	C	Mn	Al	Cr	Si	P	S	Cu
DP600	0,07	1,58	0,03	0,48	0,1	<0,02	<0,01	<0,001



**Şekil 1.** DP600 çift fazlı çeliğin; (a) orijinal, (b) kırık yüzey SEM mikroyapısı

DP600 çeliğinin gerilme-gerinim eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. Test numunelerinin hazırlanması sırasında sac malzemede oluşabilecek termal etkileri en aza indirmek için numunenin kesme işlemi su jeti ile yapılmıştır. Ayrıca test numunelerinin yan yüzeyleri metalografik olarak parlatılarak gerilme sırasında oluşabilecek çentik etkisi giderilmiştir.

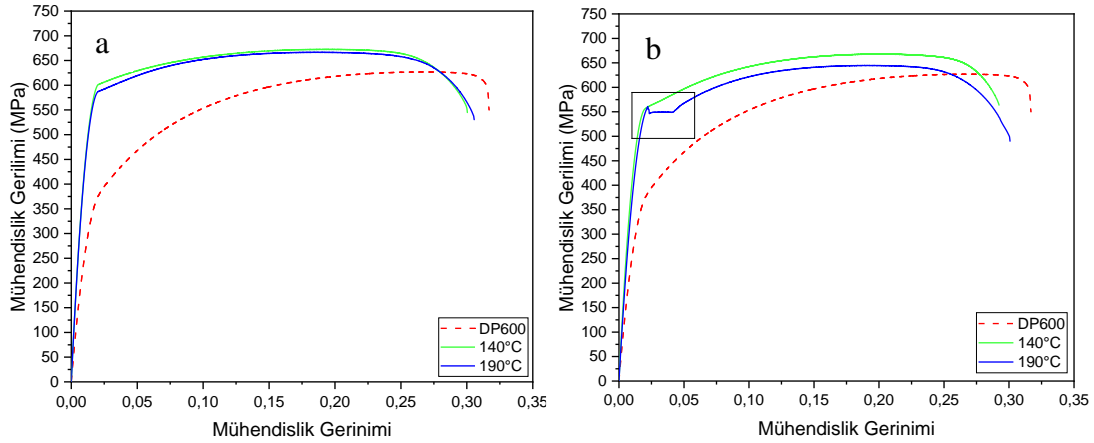


**Şekil 2.** Ticari olarak kullanılan DP600 çeliğinin gerilim-gerinim eğrisi

Mekanik özelliklerin tespiti için yapılan tek eksenli çekme testlerinde ASTM E8 standardına uygun 1.3 mm kalınlıktaki çekme test numuneleri kullanılmıştır. Standartlara uygun olarak üretilen numunelere Şekil 2’de verilen gerilim-gerinim eğrisi baz alınarak oda sıcaklığında 50 kN Instron 3369 çekme test cihazında %2 ilk ön gerinim uygulanmıştır. Daha sonra ısıl işlem fırınında (SFL sc 1206 marka yatay yüksek sıcaklık fırını) kullanılarak 30-60 dk süreyle 140 °C ve 190 °C’de statik gerinim yaşlandırılmıştır, ardından numunelere çekme test cihazında ikinci %3 ön gerinim uygulanmıştır. Tüm ön gerinim uygulamaları 2 mm.dk<sup>-1</sup> çekme hızında gerçekleştirilmiştir. İkinci gerinim sonrası statik yaşlandırma işlemleri 140 °C ve 190 °C sıcaklıklarda sadece 30 dk olarak yapılmıştır. Bu uygulamalar sonucunda akma dayanımı, çekme dayanımı, sürekli uzama ve pekleşme üssü değerleri belirlenmiştir. Metalografi işlem basamakları uygulanarak numuneler sırasıyla 120-1200’lik zımparalarda zımparalanarak pürüzsüz bir yüzeye sahip olması sağlanmıştır. Zımparalama işlemi bittikten sonra sırasıyla 3-1 µm’lik solüsyonlar kullanarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıların açığa çıkarılması amacıyla dağlayıcı olarak %3’lük Nital çözeltisi (3ml HNO<sub>3</sub>-100ml ethanol) kullanılmıştır. Mikroyapı ve kırık yüzeylerin incelenmesinde JEOL JSM-6060LV marka SEM mikroskobu kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerde Emcotest Duravision 2000 sertlik cihazında Vickers yöntemi (HV30) sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin sertliğinin belirlenmesinde yüzey ve merkez bölgelerindeki 3 farklı noktadan sertlik değerleri alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 3(a-b)’de %2 ön gerinim uygulanmış çift fazlı çeliğin sırasıyla 140° C ve 190 °C’de 30 ve 60 dk yaşlandırma sonrası gerilim-gerinim diyagramlarını görülmektedir. Her iki zaman koşulunda da akma ve çekme gerilmesinde bir artış ve homojen uzamada bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, ön gerinim ile oluşan dislokasyonların etrafındaki arayer atomlarının dislokasyon hareketlerinin engellemesi ile ilişkilidir. Aynı zamanda sıcaklık ve yaşlandırma zamanının artışı ile gerilme değerlerinin nispeten azaldığı görülmüştür. Gündüz’ün [10,11] çalışmasında da benzer sonuç gözlenmiştir. Çift fazlı çelikteki martenzitin sıcaklığın artmasıyla temperlendiği düşünülmektedir. Yaşlanma süresinin ve/veya sıcaklığının artması, mukavemet artışının azalmasına sebep olmuştur. Wilson ve Russell [12], deformasyon yaşanmasının dört aşaması olduğunu bildirmektedirler. Bunlar; (1) Dislokasyonların etrafındaki C ve N atomlarının Cottrell atmosfer oluşumunun bir sonucu olarak mukavemeti artırır. (2) mukavemet artışı karbür ve nitrür çökeltilerin oluşumu ile devam eder ve oluşan çökeltiler dislokasyonların hareketini bloke eder, (3) yeni hareketli dislokasyonların oluşumu ile deformasyon sertleşmesi oluşumuyla mukavemetleşmede artış gözlenir, (4) dislokasyon hareketini bloke eden çökeltiler çözüldükçe mukavemet azalır.

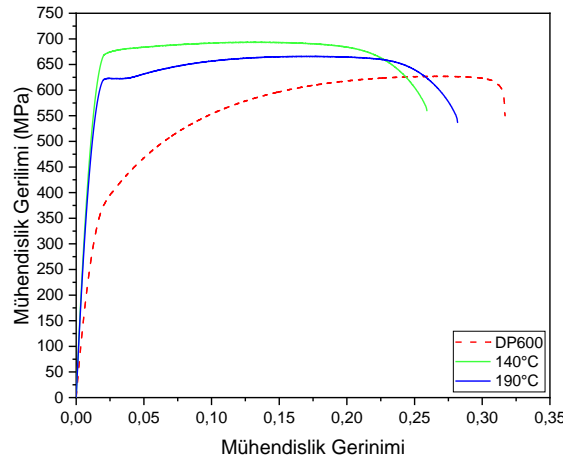


**Şekil 3.** DP600 çeliğin 140-190°C’de ;(a) 30dk, (b) 60dk süre statik gerinim yaşlandırılma sonrası gerilme-uzama diyagramları

Şekil 3 (a)’da hem 140 °C hem de 190 °C’de 30 dk sürede gerinim yaşlandırılmış numunelerde akma ve çekme değerleri orijinal işlem görmemiş numunenin değerlerine göre artarken sürekli akma davranışlarının hemen hemen korunduğu söylenebilir. Şekil 3 (b)’de aynı sıcaklıklarda 60 dk süre ile gerinim yaşlandırıldığında, 140 °C’de sürekli akma davranışı yine korunurken 190 °C sıcaklıkta tipik düşük karbonlu çeliğin çekme davranışı olan üst ve alt akma davranışı olan süreksiz akma özelliği gerçeklemiştir. Bu durumda bu özellik çift fazlı çeliklerin temel özelliğinin yitirilmesine neden olmuştur.

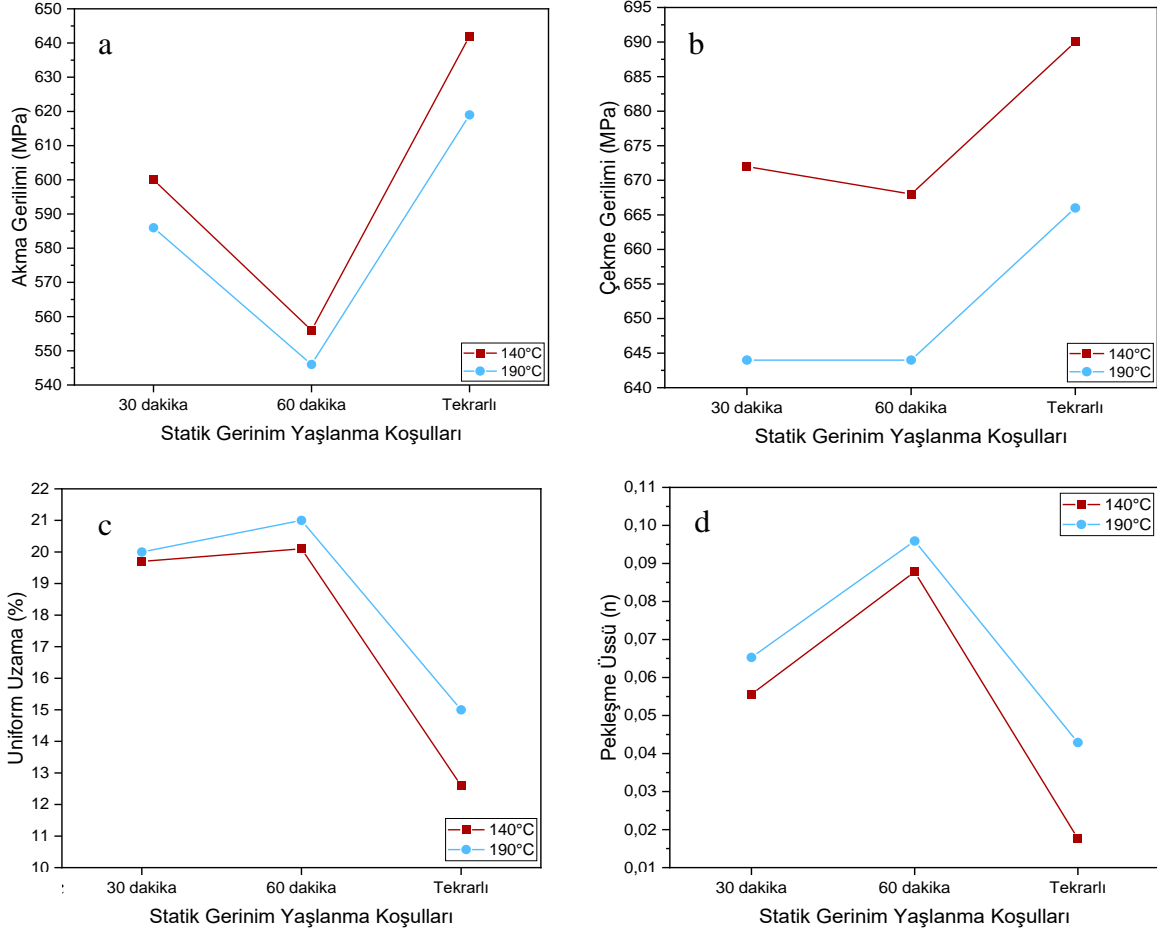
Östenitten martenzite dönüşüm sırasında hacim genişlemesinin neden olduğu ferrit-martenzit arayüzünde hareketli dislokasyonların varlığı nedeniyle çift fazlı çelikler sürekli akma davranışı sergilebilir. Bu durum elastik bölgeden plastiğe geçiş sırasında hareketli dislokasyonların martenzit çevresindeki temiz ferrit olarak bilinen epitaksiyel ferritte arayer atomlarının bulunmamasından dolayı Cottrell atmosferi etkisinin gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır [13].

Şekil 4’te, ikinci ön gerinim uygulanan DP600 çift fazlı çeliğinin gerilme-gerinim diyagramı verilmiştir. Şekil 3 (a)’da verilen tek ön gerinim uygulanmış numunelerin çekme gerilme eğrileri dikkate alındığında aynı sıcaklıklarda gerinim yaşlandırılmasında çift statik gerinim yaşlanması ile hem akma hem nihai çekme gerilme değerleri artarken, süneklik değerleri de kısmen azalmıştır. Çift statik gerinim yaşlanması ile 140 °C’de yüksek akma değerleri ile birlikte halen sürekli akma davranışı görülmüştür. Ancak 190 °C’de ise kısmen süreksiz akma davranışı görülmeye başlamıştır. Akma gerilmesindeki artışın temel nedeni olarak mobil olmayan (temiz ferritte bulunmayan) dislokasyon yoğunluğu, muhtemelen ikincil ön-gerinim ile artacaktır. Sonuç olarak, dislokasyonları hareket ettirmek için gereken itici güç ve aktivasyon enerjisi de artacaktır. Düzgün uzamanın azalması, hareketsiz dislokasyonların bir sonucu olarak düşünülmektedir.



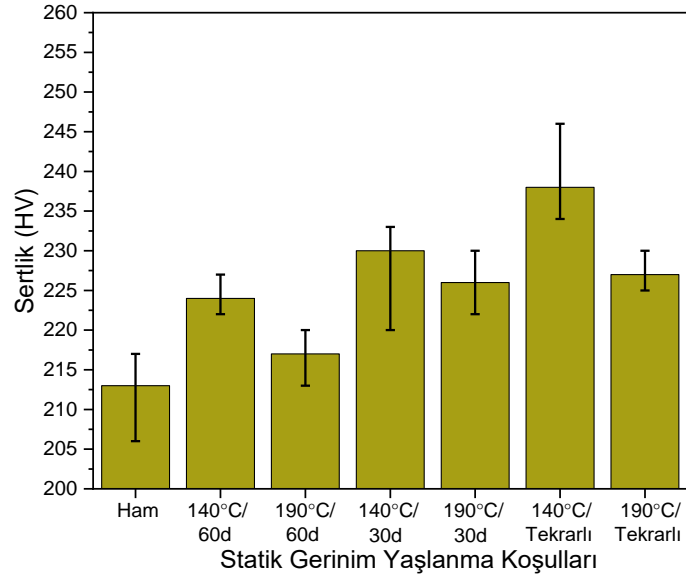
**Şekil 4.** DP600 çift fazlı çeliğinin 140° C ve 190 ° C’ sıcaklıklarda 30 dk çift statik gerinim yaşlandırılma sonrası gerilme-gerinim diyagramları

Çift statik gerinim yaşlanmasında gerçekleşen akma gerilmesi, orijinal numunenin çekme geriliminden daha yüksektir. İkinci ön gerinme aşamasında, plastik deformasyonla oluşan dislokasyonların önceki statik gerinim yaşlanmasında arayer atomlarında kilitlemiş ve hareketi engellenmiş dislokasyonlar tarafından engellendiği düşünülmektedir. Bu aşamada akma dayanımının orijinal numunenin akma ve çekme gerilmesinden daha fazla oluşmasına neden olmuş olabilir.



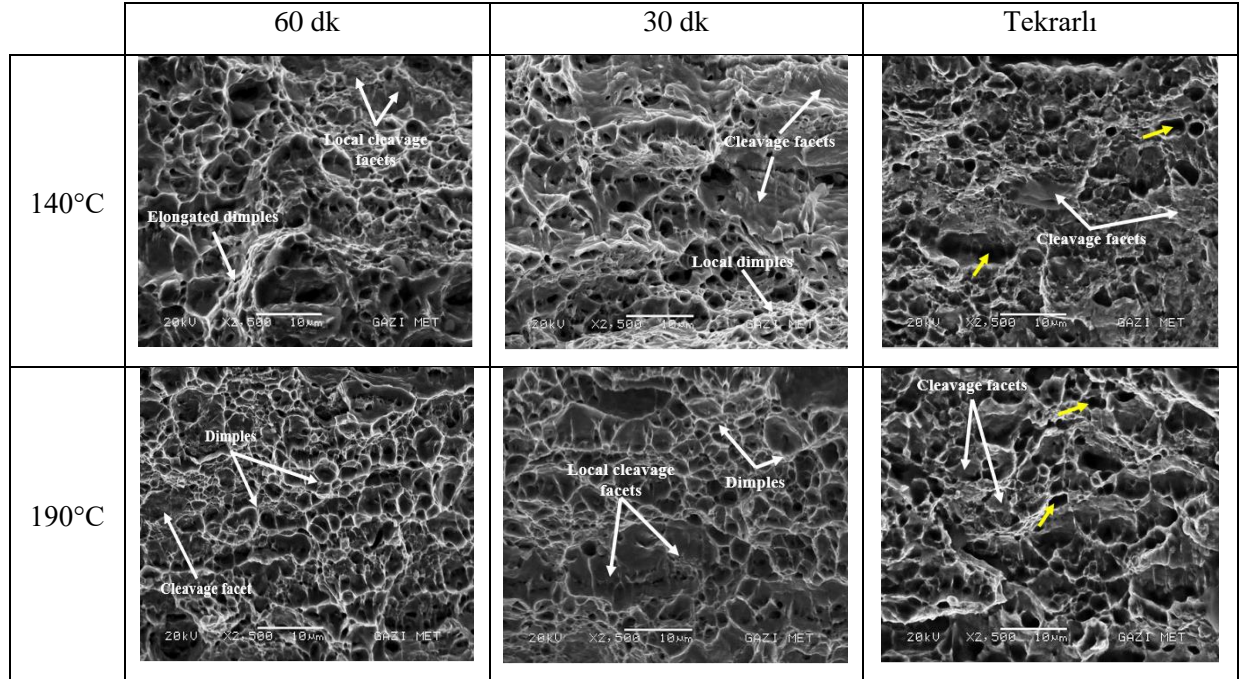
**Şekil 5.** Tek ve çift Statik gerinim yaşlanma koşuluna bağlı olarak (a) akma gerilmesi, (b) nihai çekme gerilmesi, (c) düzgün uzama, (d) pekleşme üssü grafikleri

Şekil 5'te farklı yaşlanma koşulları ile mekanik özelliklerdeki değişikliğin grafiksel durumları gösterilmektedir. Yaşlandırma süresinin 30 dakikadan 60 dakikaya yükselmesiyle akma dayanımında azalma, homojen uzama ve pekleşme üssü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Artan sürenin çekme mukavemetine önemli bir etkisi görülmemiştir. Artan sıcaklıkla birlikte akma dayanımı ve çekme dayanımı azalarak homojen uzama ve pekleşme üssü değerleri artmıştır. Tekrarlanan yaşlandırma ile klasik yaşlanmaya göre daha yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı, daha düşük homojen uzama ve pekleşme üssü elde edilmiştir. Statik gerinim yaşlanması ile çelikler kırılgan hale gelmekte ve numunenin homojen uzaması azalmaktadır.



Şekil 6. Farklı yaşlanma koşullarında DP600'ün sertlik değişim grafiği

Şekil 6'da farklı statik gerinim yaşlanma koşulları ile sertlikte meydana gelen değişiklikler gösterilmektedir. Statik gerinim yaşlanmasının bir sonucu olarak artan sertlik belirgin olarak gözlenmiştir. Artan zamanla/sıcaklıkla dislokasyonlarda çözünen izole arayer atomlarının [12] serbest kalması ile dislokasyon hareketini engelleyen unsur ortadan kalkmış ya da muhtemelen kısmi dinamik toparlanma süreci de başlamıştır. Sonuç olarak, sertlikte bir azalma gözlenmiştir. Tekrarlanan yaşlanmada artan sertlik, çift statik gerinim yaşlanması ile dislokasyon hareketinin bloke edilmesinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Numunelerin kırık yüzey fotoğrafları

Kırık yüzey fotoğrafları Şekil 7'de gösterilmektedir. Malzemelerin statik yaşlanma ile kırılma hali geldiği belirtilmiştir. Numunelerin kırık yüzey fotoğrafları bunu doğrulamaktadır. Yaşlanmanın artması, malzemenin klivaj yüzeylerini arttırmıştır. Tekrarlanan yaşlanmadaki bu artış kırılmanın biraz daha gevrek olarak gerçekleşmesine neden olmuştur. Tekrarlanan yaşlandırmada, sarı oklarla gösterilen boşlukların yoğunluğu önemli ölçüde artmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Statik gerinim yaşlanması ile akma ve çekme gerilmesi ile sertlikte artışı, homojen uzama ve pekleşme üssünde azalmaya neden olmuştur. Bu durum, dislokasyonlar etrafında Cottrell atmosferlerinin oluşması nedeniyle hareketli dislokasyonların sayısındaki azalma ile ilişkilidir.
- Yaşlanma sıcaklığının 140 °C'den 190 °C'ye yükselmesi, martenzitte başlayan temperlenme ve/veya toparlanma sürecinden dolayı tavlama ya da çekme gerilmesi ile sertlikte azalmaya neden olmuştur.
- Yaşlanma süresinin artmasıyla birlikte yaşlanmanın mukavemete etkisi azalmıştır. Artan zamanın bir sonucu olarak, mikro-çökeltilerin dislokasyonlarda çözünerek dislokasyon hareketinin başlamasına neden olabilir.
- Hareketsiz hale getirilmiş dislokasyon yoğunluğu muhtemelen tekrarlanan yaşlanma ile artacaktır. Sonuç olarak, dislokasyonları hareket ettirmek için gereken güç artmıştır. Homojen uzamadaki azalma, hareketsiz dislokasyonların artmasının bir sonucu olarak düşünülmektedir.
- Çift statik gerinim yaşlandırma sonucunda, tek statik gerinim yaşlandırmasına göre daha yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı, daha düşük homojen uzama ve pekleşme üssü elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 07/2018-05 ve 65/2019-05 numaralı proje kapsamında Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Galán J, Samek L, Verleysen P, Verbeken K, Houbaert Y. Advanced high strength steels for automotive industry. Rev Metal. 2012;48(2):118–31.
- [2] Davies RG, Magee CL. Physical Metallurgy of Automotive High-Strength Steels. J Met. 1979;31(11):17–23.
- [3] Ahmad E, Priestner R. Effect of Rolling in the Intercritical Region on the Tensile Properties of Dual-Phase Steel. J Mater Eng Perform. 1998;7(6):772–6.
- [4] Erdogan M, Priestner R. Effect of epitaxial ferrite on yielding and plastic flow in dual phase steel in tension and compression. Mater Sci Technol. 1999;15(11):1273–84.
- [5] Alaneme KK, Kamma CM. Phase transformation studies of a low alloy steel in the ( $\alpha + \gamma$ ) phase region. Mater Res. 2010;13(1):113–7.
- [6] Erdogan M, Priestner R. Effect of martensite content, its dispersion, and epitaxial ferrite content on Bauschinger behaviour of dual phase steel. Mater Sci Technol. 2002;18(4):369–76.
- [7] Sun S, Pugh M. Properties of thermomechanically processed dual-phase steels containing fibrous martensite. Mater Sci Eng A. 2002;335(1–2):298–308.

- [8] Palkowski H, Anke T. Bake Hardening of Hot Rolled Multiphase Steels under Biaxial Pre-strained Conditions. 2006;77(9):675–9.
- [9] Waterschoot T, De AK, Vandeputte S, de Cooman BC. Static strain aging phenomena in cold-rolled dual-phase steels. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci.* 2003;34(13):781–91.
- [10] Gündüz S, Demir B, Kaçar R. Effect of aging temperature and martensite by volume on strain aging behaviour of dual phase steel. *Ironmak Steelmak.* 2008;35(1):63–8.
- [11] Gündüz S. Static strain ageing behaviour of dual phase steels. *Mater Sci Eng A.* 2008;486(1– 2):63–71.
- [12] Wilson DV, Russell B. The contribution of precipitation to strain ageing in low carbon steels. *Acta Metall.* 1960;8(7):468–79.
- [13] Zhang J, Di H, Deng Y, Misra RDK. Effect of martensite morphology and volume fraction on strain hardening and fracture behavior of martensite-ferrite dual phase steel. *Mater Sci Eng A.* 2015;627:230–40.

## Effects of Wood and Composite Panel Powders on Human Health in Furniture Producing Enterprises

 Hamza ÇINAR  Kemal YILDIRIM\*  Erkan OKURCAN 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

The results obtained from this study and the recommendations developed in order to determine whether the wood and composite panel powders in furniture producing enterprises have effects on human health are systematically explained below.

#### Article Info:

Research article  
 Received: 02/10/2020  
 Revision: 13/10/2020  
 Accepted: 23/10/2020

#### Highlights

- Occupational health.
- Wood dust.
- Eco design.

#### Keywords

Furniture  
 Dust  
 Wood dust  
 Eco design  
 Occupational health.

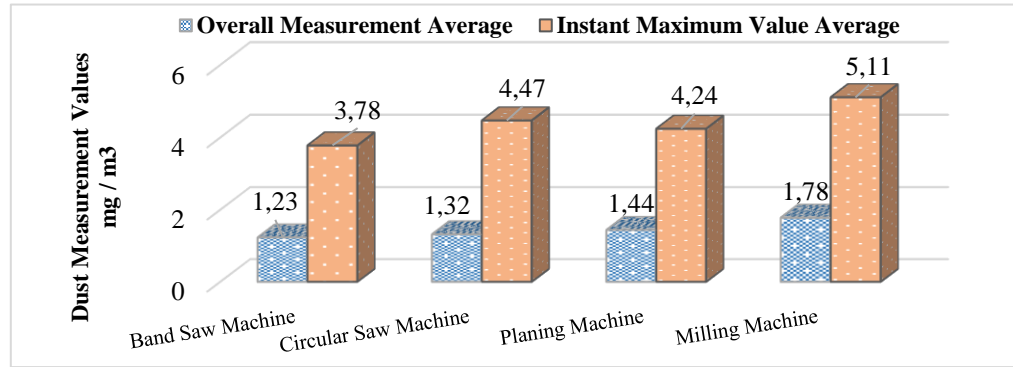


Figure A. Dust emission measurement values according to the machines used by the enterprises

**Purpose:** This research aims to determine the effects of wood and composite panel dust on human health in furniture producing enterprises.

**Theory and Methods:** For this aim, dust measurements and observations were conducted in 20 different establishments. Dust measurements of all establishments were made with Personal Dust Exposure Meter (TSI SIDEPAK AM 510).

**Results:** Dust measurement average of all enterprises is 1,43 mg/m<sup>3</sup> and instantaneous maximum dust measurement value is determined as 19,46 mg/m<sup>3</sup>. Dust values were measured as 1,89 mg/m<sup>3</sup> in small-scale enterprises, 0,96 mg/m<sup>3</sup> in medium-sized enterprises, 1,27 mg/m<sup>3</sup> in wood processing enterprises and 1,58 mg/m<sup>3</sup> in composite processing enterprises. Single and multiple variables (operating sizes, operating types, ventilation systems, machines used) have various effects on dust exposure levels.

**Conclusion:** Considering that chemicals in wood and composite panel dusts may cause these discomforts, it is concluded that employees should be given rotation and protective measures should be taken. It should not be forgotten that occupational health and safety measures are of vital importance to be taken by businesses, and employees should be made aware of occupational safety training and in-service training. Studies should be made to gain the habit of using protective equipment. A number of possible health problems will be prevented by applying rotation to employees with high dust exposure.





## Mobilya Üreten İşletmelerde Ahşap ve Kompozit Panel Tozlarının İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Hamza ÇINAR Kemal YILDIRIM\* Erkan OKURCAN

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu araştırmada, mobilya üreten işletmelerdeki ahşap ve kompozit panel tozlarının insan sağlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak 20 farklı işletmede toz ölçümleri ve gözlemler yapılmıştır. Tüm işletmelerin toz ölçümleri Kişisel Toz Maruziyet Ölçüm Cihazı (TSI SIDEPK AM 510) ile yapılmış, ortalaması 1,43 mg/m<sup>3</sup>, anlık maksimum ölçüm değeri ise 19,46 mg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Toz değerleri küçük ölçekli işletmelerde 1,89 mg/m<sup>3</sup>, orta ölçekli işletmelerde 0,96 mg/m<sup>3</sup>, ağaç işleyen işletmelerde 1,27 mg/m<sup>3</sup>, kompozit işleyen işletmelerde 1,58 mg/m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Toza maruz kalma seviyelerinde tekli ve çoklu değişkenlerin (işletme büyüklükleri, işletme türleri, havalandırma sistemleri, kullanılan makineler) çeşitli etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Ağaç ve kompozit panel tozlarının içerisindeki kimyasalların bu rahatsızlıklara neden olabileceği düşünülerek, çalışanlara rotasyon uygulanması ve koruyucu önlemlerin alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

### Effects of Wood and Composite Panel Powders on Human Health in Furniture Producing Enterprises

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 02/10/2020  
Düzeltilme: 13/10/2020  
Kabul: 23/10/2020

#### Anahtar Kelimeler

Mobilya  
Toz  
Ahşap tozu  
Eko tasarım  
İş sağlığı.

#### Keywords

Furniture  
Dust  
Wood dust  
Eco design  
Occupational health.

#### Abstract

This research aims to determine the effects of wood and composite panel dust on human health in furniture producing enterprises. For this aim, dust measurements and observations were conducted in 20 different establishments. Dust measurements of all establishments were made with Personal Dust Exposure Meter (TSI SIDEPK AM 510). Dust measurement average of all enterprises is 1,43 mg/m<sup>3</sup> and instantaneous maximum dust measurement value is determined as 19,46 mg/m<sup>3</sup>. Dust values were measured as 1,89 mg/m<sup>3</sup> in small-scale enterprises, 0,96 mg/m<sup>3</sup> in medium-sized enterprises, 1,27 mg/m<sup>3</sup> in wood processing enterprises and 1,58 mg/m<sup>3</sup> in composite processing enterprises. Single and multiple variables (operating sizes, operating types, ventilation systems, machines used) have various effects on dust exposure levels. Considering that chemicals in wood and composite panel dusts may cause these discomforts, it is concluded that employees should be given rotation and protective measures should be taken.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mobilya, Latince’de “mobilius” sözcüğünden türetilmiş olup, insanın ve toplumun günlük yaşayışında her alanda ihtiyaçlarını karşılayan, yaşam kalitesini doğrudan etkileyen, her çağın çizgilerini ve biçimlerini taşıyan kültürel ve estetik değere sahip bir üründür [1]. Bu tanıma ek olarak, mobilya, günlük yaşamın her alanında yer edinen, bireyin veya toplumun refahını sağlayan, yaşama yönelik sosyal ve kültürel gereksinimlere hizmette bulunan bir ürün olmakla birlikte, mekân ile insan yaşam kalitesini doğrudan etkileyen, herkesin kullandığı ve ihtiyacı olduğu bir ürün olarak tanımlanabilir [2].

Mobilya insan yaşamında önemli bir yer edinirken ticareti ve ülke sanayisine kattığı katma değer anlamlıdır. Örneğin; mobilya sanayi katma değer açısından Türkiye’de önde gelen sektörlerinden olup,

ihracatta yerli kaynakları en çok kullanan ve ithal ürünlere bağımlılığı en az olan sektörlerden biri olarak ekonomiye katkısı artarak devam etmektedir [3].

Sektör son yıllarda üretim ve ihracat hacmini artırmakla birlikte son iki yılda hafif düşüş eğilimlidir. 2016 yılında 225 ülkeye 2,234 milyar dolar ihracat (-%1), 130 ülkeden 605 milyon dolar ithalat (-%28,8) yapan ve 2001'den bu yana dış ticaret açığı vermeyen Türkiye ve dünya pazarında sayılı sektörlerden birisi olmuştur. Sektör, 2023 yılı için 25 milyar dolar üretim ve 10 milyar dolar ihracat beklentisi ile dünya mobilya ihracatında ilk 10, Avrupa'nın ise ilk 5 büyük mobilya ihracatçısı konumuna yükselmeyi hedeflemektedir [4].

Son yıllardaki kentleşme ve nüfus artışı sebebiyle mobilyaya ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, mobilya sektöründe birçok gelişim ve değişim olmaktadır. Bu gelişim ile birlikte ahşap işleyen endüstrilerde çalışan insanlarda birtakım sağlık sorunlarının meydana gelebilme olasılığı da artmıştır [5-7]. Ahşap esaslı malzemeleri işleyen endüstrilerde kesme, biçme, rendeleme, şekillendirme ve en önemlisi zımparalama sırasında fazla miktarda küçük parçacıklı ahşap tozu işletme ortamının havasına karışmaktadır [8-10]. Özellikle bazı cins ağaç malzemelerden çıkan tozlar çeşitli sağlık sorunlarına neden olmaktadır.

Son zamanlarda iş esnasında sağlığın önem kazanması ile yabancı ülkelerde inceleme ve araştırmalar yapılarak meydana gelen hastalıklar üzerinde durulmaya başlanmıştır [11]. Mobilya sektöründeki hastalık etkenleri arasında; ahşap tozu (özellikle marangozluk işlemleri sırasında) ve kimyasallar (örneğin yapıştırıcıların içerdiği formaldehit, boya ve cilaların içerdiği çözücü vs.) nedeniyle meydana gelen kanser, cilt ve göz tahrişi, solunum yolu rahatsızlıkları gibi hastalıklar oldukça önem arz etmektedir [12-17]. Bu hastalık etkenlerinin sebep olduğu etkiyi azaltmak için çeşitli işletmelerde risk analizleri yapılarak, iş sağlığı ve güvenliği kapsamında gerekli önlemler alınıp, mobilya sektörünün gelişip daha verimli hale gelmesi sağlanmalı ve insan sağlığı korunmalıdır.

Lion ve ark. [18] tarafından yapılan bir çalışmada ahşap tozuna maruz kalma ile ilişkili sağlık tehlikeleri Joss stik üretim tesislerinde araştırılmıştır. Bu amaçla, Joss stick üreticilerinden dört, paketleme işçilerinden iki adet olmak üzere toplamda altı hava örneği toplanmıştır. Dört joss çubuk üreticisi için toplam toz konsantrasyonları 11,1, 21,6, 22,6 ve 42,7 mg/m<sup>3</sup>, paketleme işçileri için toz konsantrasyonları sırasıyla 1,8 ve 3,1 mg/m<sup>3</sup>tür. Kuru joss çubuk üretim yöntemlerinde ıslak üretim yöntemlerine göre daha yüksek toz seviyeleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yüksek düzeyde solunabilir tozlara maruz kalan Joss stik fabrikalarında çalışan işçiler yüksek maruziyet grubu olarak kabul edilmiştir.

Leclerc ve ark. [19] tarafından Fransa'da sinonazal kanser için mesleki risk faktörlerinin araştırıldığı bir vaka kontrol çalışması yapılmıştır. Histolojik olarak kanser olduğu doğrulanmış 207 olgu ve 409 kontrol kullanılan çalışmada sinonazal kanserin odun tozuna maruz kalma riski ile ilişkisi bu iki grupta incelenmiştir. Sonuç olarak, formaldehit türevli reçineler içeren kompozit ahşap da dâhil, diğer ağaç türlerinden gelen toza maruziyetle, sert odun tozuna maruz kalma riskinin adenokarsinomu önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Özetle, Fransa'daki bu nazal kanser çalışması, sert ahşap tozu ve adenokarsinomaya maruz kalma arasındaki ilişkiye dair ayrıntılı kanıtlar sunmaktadır. Bu sonuçlar, işçilerin maruz kaldığı odun tozunun miktarını azaltmak için önleyici tedbirlerin uygulanmasının Fransa'da önemli bir amaç olduğunu göstermektedir.

Okwari ve ark. [20] Nijerya'nın Calabar şehrinde kereste pazarlarında odun tozuna maruz kalan işçilerin akciğer fonksiyon durumu incelenmiştir. Çalışmada 20-25 yaş arasında işçiler tercih edilmiştir. 221 adet test grubu ve 200 adet kontrol grubu üzerinde abanoz ve iroko gibi yerel ormanlardan gelen toza karşı kronik maruziyetin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada Zorunlu Vital Kapasite (FVC), bir saniyede Zorlu Ekspiratuar Volüm, (FEV1), Zorlu Ekspiratuar Volüm Yüzdesi olarak (FEV1%) ve Tepe Ekspiratuar Akım Hızı (PEFR) gibi antropometrik parametreler ve odun tozuna maruz kalan işçilerin akciğer fonksiyon indeksleri incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda solunabilir tozun konsantrasyonu test grubunda (P <0,001), kontrol grubuna oranla anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur. Kereste işçilerinin FVC, FEV1, FEV1% ve PEFR ortalama değerleri ise kontrol deneklerine oranla anlamlı olarak düşük bulunmuştur (P <0,01). Öksürük gibi solunumsal semptomlar, göğüs ağrısı ve burun tahrişi test grubunda kontrol grubuna göre daha yüksek çıkmıştır. Test grubunda non-solunumsal semptomlar (cilt ve göz

tahrişi) yaygın olarak bulunmasına rağmen kontrol grubunda bulunmamıştır. Sonuç olarak, odun tozuna maruz kalmanın akciğer fonksiyonunu bozduğu belirtilmiştir.

Sönmez ve ark. [21], tarafından Ankara'da mobilya sektöründe faaliyet gösteren küçük ve orta büyüklükteki işletmelerde fiziksel çevre koşullarından ortam faktörlerinin değerlendirilmesi amacıyla toplam 87 işletme yöneticisi ile yüz yüze görüşülerek anket uygulanmış ve mülakat yapılmıştır. Araştırma sonucunda havalandırma düzeyi ile ilgili olarak, mikro ölçekli işletmeler ile küçük ve orta ölçekli işletmeler arasında (I-J=0,53), (I-J=0,57) küçük ve orta ölçekli işletmeler lehine bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Ayrıca hava şartları, toz ve temizliğin yetersiz olduğu belirtilmiştir.

Shamssain [22] odun tozuna maruz kalan işçilerde solunum fonksiyon ve semptomları belirlemek amacıyla bir araştırma yapmıştır. 145 (77 Erkek, 68 Kadın) sigara içmeyen işçi hammadde deposunda ahşap tozu ve Umtata, Transkes'te bir mobilya firmasının arızalı değirmen ahşap bölümünde toza maruz bırakılmıştır. Kontrol grubu olarak ise 152 (77 erkek, 75 kadın) sigara içmeyen işçi aynı şehirde kirletici olmayan bir işleme firmasında görev yapmıştır. Zorlu Viral Kapasite (FVC), bir saniyedeki Zorlu Ekspiratuar Volüm (FEV), Zorlu Ekspiratuar Oran (FEV, /FVC x 100), Zorlu Ekspiratuar Akım (FEF), Zorlanmış Orta Ekspiratuar Akım (FMF), Pik Ekspiratuar Akım (PEF) ve solunum semptomları (öksürük, balgam, nefes darlığı, hışıltılı solunum ve nazal semptomlar) ölçülmüştür. Bu araştırmalar sonucunda çam ve lif ahşabı tozuna maruz kalan işçilerin, kontrol deneklerine göre daha fazla solunum yolu semptomlarına sahip olduğu ve bu maruz kalmanın hava akımı obstrüksiyonu riskini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Bislimovska ve ark. [23] parke tozuna maruz kalan işçilerde solunum etkilerini değerlendirmek amacıyla 37'şer grup olmak üzere parke tozuna maruz kalan ve hiçbir zaman sigara içmeyen erkek işçileri ve kontrol olarak sigara kullanmayan ofis çalışanlarını seçerek kesitsel bir çalışma gerçekleştirmiştir. 12 aylık süre sonunda solunum semptomlarını incelemiştir. Bu incelemeler sonucunda parke imalatçılarında, ofis çalışanlarına göre yüksek düzeyde öksürük ve balgamda artış saptanmıştır. Parke imalatçılarındaki solunumsal semptomların çoğunun iş yerinde maruz kalınan tozla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Zorunlu ventilasyon kapasitesi (FVC) hariç tüm spirometrik parametrelerin ortalama değerleri, parke imalatçılarında (ofis çalışanlarındaki ortalama değerlere göre) anlamlı olarak daha düşük bulunmuştur. Tüm bu veriler sonucunda parke tozuna maruz kalınmasının solunum sağlığını olumsuz yönde etkilediğini ve bu sebeple koruyucu önlemlerin alınmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.

Goldsmith ve Shy [24]'da mesleki nedenlerden dolayı ahşap tozuna maruz kalan işçilerin solunum sağlığını incelemek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu araştırmada alkaloidler, asitler ve diğer doğal bileşenlerin varlığının, pulmoner duyarlılığı ürettiğini ayrıca ince odun tozuna yıllarca maruz kalmanın, mukostasis ve metaplaziyi başlatan ve nazal sinüslerin adenokarsinomasına yol açan doku hasarı üretmesinin de muhtemel olduğunu belirtmişlerdir.

Holmström ve Wilhelmsson [25] formaldehit ve odun tozu-formaldehit kombinasyonunun alt ve üst solunum yollarına etkilerini araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Formaldehit, odun tozu-formaldehit ve kontrol grubu olmak üzere 3 grup oluşturulmuştur. Maruz gruplar ve kontrol grubu arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (formaldehit grubu için  $P < 0,001$  ve odun tozu-formaldehit grubu için  $P < 0,01$ ). Aynı zamanda alt solunum yollarından, trakea ve bronşiye ait semptomlar, maruz kalan gruplarda daha sık bulunmuştur. Hem üst hem de alt solunum yollarında meydana gelen rahatsızlık, maruz bırakılan grupta, maruz bırakılmayan gruptan daha sık bulunmuştur. Spirometrik testlerin sonuçlarında ise maruz kalan grupların ortalama FVC'si beklenen değerden ( $P < 0,001$ ) anlamlı olarak düşük bulunmuş olup, formaldehit grubunda FVC'deki bu fark 0,577 I bulunurken odun tozu-formaldehit grubunda 0,664 I olarak bulunmuştur. Kontrol grubundaki FVC değeri de beklenen değerden önemli ölçüde farklı bulunmamıştır.

Osman ve Pala [26] Bursa / Türkiye'de küçük bir sanayi bölgesinde mobilya endüstrisinde ahşap tozuna maruz kalmanın sağlığa etkilerini araştırmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ekim 2006 ve Mayıs 2007 tarihleri arasında gerçekleştirilen bu çalışmada, 328 ahşap işçisi ve 328 kontrol olmak üzere toplam 656 kişi araştırılmıştır. Araştırmada bir anket kullanılmıştır. Fiziksel muayene ve işçilerin solunum fonksiyon testleri (MIR-Spirobank G) yapılmıştır. İş yerlerinden odun tozu örnekleri toplamak için taşınabilir bir Aircheck 2000 pompası, tozun gravimetrik ölçümleri için ise NIOSH metodu kullanılmıştır. İşyerindeki ortalama toz konsantrasyonu  $2,04 \pm 1,53 \text{ mg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. İşçilerin 176'sında (%)

53,7) çalışılırken burun tıkanmış, 141'inde (% 43,0) gözlerin kızarıklığı, 135'inde (% 41.2) kaşıntı, 78'inde (% 23,8) burun akıntısı olduğu bildirilmiştir. Kontrol grubunda işyerinde çalışırken herhangi bir semptom görülmemiştir. Hem içiciler hem de sigara içmeyenler arasında odun işçilerinin ortalama FEV1 ve FVC değerleri, FEV1 / FVC değeri yüksek olmasına rağmen anlamlı olarak düşük bulunmuştur ( $p < 0,05$ ). Yaşları 10 yıldan az bir çalışma süresine sahip olan ve 4 mg/m<sup>3</sup>'ün üzerindeki odun tozuna maruz kalan odun işçilerinde, 4 mg'dan az ahşap tozuna maruz kalan ağaç işçilerine göre, FEV1 ve FVC değerlerinde artış tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada ahşap tozuna maruz kalmanın çalışanların solunum fonksiyonlarını olumsuz etkilediği belirtilmiştir.

Semerci [27] yaptığı çalışmada, Akdeniz bölgesi safi kızılçam işleyen kereste işletmelerinde anket yaparak işçilerin sağlık sorunlarını araştırmıştır. İşçilere demografik faktörler, işletme içi mevcut (fiziksel ve çevresel) faktörler ve ergonomik faktörler olmak üzere üç ana başlıkta sorular sorularak istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. Toplam 413 çalışana uygulanan anket sonucunda, kızılçam işleyen kereste fabrikalarında toza bağlı alerjik reaksiyonların (%23,2), gözlerde kızarıklık ve yanma şikâyetlerinin (%27,4), nefes darlığı (%30,5) problemlerinin yaşandığını tespit etmişlerdir.

Gürlevik [28] tarafından Ankara ilinde Sincan Organize Sanayi Bölgesinde bulunan ve bünyesinde endüstriyel havalandırma sistemi bulunan 4 firmada toz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel havalandırma sistemi bulunmayan işyerlerinden ise çalışmaya katılımı kabul eden tek işyerinde ölçüm gerçekleştirilmiştir. Toz maruziyeti ölçüm değerleri "Bağımsız Örneklem T Testi" ile belirlenmiş olup sonuç olarak endüstriyel havalandırma sistemi olan işletmelerdeki toz ölçüm sonuçlarının ortalaması ile endüstriyel havalandırma olmayan işyerlerindeki toz ölçüm sonuçlarının ortalaması arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur ( $p=0,001$ ).

Rosenberg [29], taze odun kesilirken meydana çıkan odun tozu ve monoterpenlerin çalışanlara verdiği zararı araştırmışlardır. Bu amaçla 1997-1999 yılları arasında çam ve ladin işleyen 22 adet testere işçisini incelemişlerdir. Çam ve ladin işlenmesinde kereste işçileri arasında monoterpenlere (geometrik ortalama, GM) maruz kalma sırasıyla 6,1-13,8 mg / m<sup>3</sup> ve 2,0-13 mg / m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Solunabilir toz konsantrasyonu çam işleme sırasında 0,5-2,2 mg / m<sup>3</sup> ve ladin işleme sırasında 0,4-1,9 mg / m<sup>3</sup>'tür. Semptomların, gözlerde veya solunum yollarında görülme sıklığı her iki ağaç türünde yüksek bulunmuştur. Monoterpenlere ve ahşap tozuna maruz kalma ile ilgili semptomlar arasında gözlerin, mukoza zarının ve cildin tahriş olması sayılmıştır.

Barcenas ve ark. [30], bir akciğer kanseri vakası kontrol çalışmasında, 1368 akciğer kanseri hastası ve 1192 kanser olmayan yetişkin arasında detaylı kişisel görüşme ile epidemiyolojik verileri toplayarak araştırma yapmıştır. Sonuç olarak odun tozuna maruz kalmanın akciğer kanseri için potansiyel bir risk faktörü olduğunu bildirmişlerdir.

Douwes ve ark. [31]'nin çam kerestesi işleyen işletmelerde çalışan işçilerin solunum fonksiyonlarını araştırmak için yaptığı çalışmada, 772 adet çam kereste fabrikası çalışanına solunum sağlığı anketi uygulanmıştır. Sonuç olarak, toza maruz kalan işçilerdeki astım genel popülasyondan daha yaygın olarak bulunmuştur.

Innos ve ark. [32] tarafından yapılan bir çalışmada, 1968 ve 1995 yılları arasında 3723 erkek ve 3063 kadında kanser insidansı, Estonya'nın genel nüfusu ile karşılaştırılmıştır. Mesleki ahşap tozu maruziyeti, erkeklerde sinonazal kanser riskinin artması ile ilişkili bulunurken, kadınlarda sinonazal kansere bağlı olup olmadığı belirlenememiştir. Bu çalışmada, mobilya işçilerinde fazladan kolon ve rektum kanseri saptanmış olup, toplam kanser riskinde artış gözlenmemiştir.

Türkiye'de tozun insan sağlığına etkileri üzerine yeterince çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmada, mobilya üreten işletmelerde tozun ortaya çıkış nedenlerinin araştırılması, işletmelerdeki toz miktarlarının ölçülmesi, tozların kontrol altında tutulmasının gerekliliği ve insan sağlığı üzerinde etkileri incelenmektedir.

Bu amaçla Ankara Siteler bölgesinde 20 farklı işletmede, 5 farklı makinede çalışan işçiler üzerinde ölçümler yapılarak iş sağlığı ve güvenliği standartlarına uygun değerler olup olmadığı incelenecek ve tozların insan sağlığı üzerine etkileri belirlenecektir. Ayrıca bu işletmelerde çalışan kişilerle yüz yüze görüşme yapılarak buradan elde edilecek veriler toz ölçüm değerleri analiz edilecektir.

## 2. YÖNTEM (METHOD)

### 2.1. Araştırma Ortamı (Research Environment)

Araştırma bölgesi olarak Ankara ilinde mobilya üretiminin yoğunlukta olduğu ve Türkiye mobilya üretiminin önde gelen bölgelerinden biri olan Siteler seçilmiştir. Daha homojen verileri elde etmek amacıyla seçilmiş olan bu bölge de tozun oluşum nedenleri, süreçleri ve sonuçlarının belirlenmesi amacıyla, rastgele seçilmiş 10 adet küçük ölçekli ve 10 adette orta ölçekli olmak üzere toplam 20 adet KOBİ’de toz ölçümleri ve gözlemlerden oluşan bir araştırma yapılmıştır.

Araştırma yapılan işletmelerin büyüklükleri, kullandıkları malzeme türü ve havalandırma şekline ilişkin veriler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** İşletme türlerine göre havalandırma sistemleri

İşletmenin Özelliği		Havalandırma Sistemi (%)			
		N	Doğal	Aspiratör	Emme Sistemi
Küçük ölçekli	Ağaç malzeme	5	100	75	-
	Kompozit levha	5	100	75	-
Orta ölçekli	Ağaç malzeme	5	100	75	100
	Kompozit levha	5	100	75	100

N: İşletme sayısı

Tablo 1’e göre, küçük ve orta ölçekli işletmelerin %75’inde aspiratör kullanıldığı, orta ölçekli işletmelerin tamamında da toz emme sisteminin bulunduğu görülmektedir. Diğer taraftan, ağaç malzeme işleyen küçük ölçekli işletmelerin birisinde aspiratör destekli basit tarzda bir emme sistemi vardır, fakat bakımsız ve işlevsizdir. Bu durum toz oluşumunun çoğunlukta olduğu küçük ölçekli işletme türünde büyük bir sorun olarak göze çarpmaktadır.

Araştırma yapılan işletmelerin makine parkına ve ısıtıcı kaynaklarına ilişkin mevcut durum bilgileri belirlenmiştir. Buna göre, mobilya sektöründe yaygın olarak kullanılan şerit testere, daire testere, planya, freze gibi makinelerin yanı sıra, orta ölçekli bazı işletmelerde çoklu delik, CNC gibi makinelerinde kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, işletme büyüklüğüne bağlı olarak, makinelerin sayılarının ve kullanım yoğunluklarının arttığı görülmektedir. Bu durum, işletmelerin büyüklüğünün artmasıyla üretimin ve buna bağlı olarak toz oluşum kaynaklarının da arttığını göstermektedir. Diğer taraftan, işletmelerin %85’inde katı yakıt kullanılan sobaların, %15’inde ise elektrikli ısıtıcıların kullanıldığı görülmektedir. Hiçbir işletmede merkezi ısıtma sistemi, güneş enerjili sistemler veya dönüştürülebilir enerji kullanılan bir ısıtma sistemine rastlanmamıştır.

### 2.2. Toz Ölçüm Cihazı ve Uygulama Prosedürü (Dust Meter and Application Procedure)

Araştırma kapsamına alınan işletmelerde çalışan personelin maruz kaldığı toz seviyelerinin belirlenmesinde TSI SIDEPK AM 510 adlı cihaz kullanılmıştır (Şekil 1a, Tablo 2). Bu cihaz ile 1 µm’den 10 µm’ye kadar büyüklüğe sahip tozları ölçebilen impaktörlerden herhangi biri takılarak, istenilen zaman aralığında toz ölçümleri alınabilmekte ve tüm veriler cihaz hafızasına kaydedilmektedir. Cihazın LCD ekranından ölçüm sonuçları en küçük, en büyük ve ortalama değerler şeklinde okunabilmekte, cihazın bilgisayara bağlanmasıyla kaydedilen veriler tablolar halinde ve grafikler şeklinde görülebilmektedir.

**Tablo 2.** Kişisel toz maruziyet ölçüm cihazı teknik özellikleri

Toz konsantrasyonu ölçüm aralığı	0.001-20 mg/m <sup>3</sup>
Toz büyüklüğü aralığı	0.1-10 µm
Çalışma sıcaklığı	0-50 0C
Ölçüm hafızası	31 000 veri
Kayıt aralığı	1 saniyede veya 1 dakikada bir
İmpaktörler (µm)	1, 2,5, 4, 10
Boyut	106 x92 x70mm
Kütle	0.46 kg
Ekran	2 satır LCD

İşletmelerde ölçüm öncesinde, ortam tozlarının  $\text{mg}/\text{m}^3$  cinsinden ölçülebilmesi için cihaza  $10\mu\text{m}$  büyüklüğe sahip tozları ölçebilen impaktör takılmıştır. Ayrıca, ölçümlerin daha kolay alınması ve belli standart verilerle karşılaştırılabilmesi için cihazda 15 dakikalık sürelerde ve saniyede bir veri alacak şekilde çalışan bir program oluşturulmuştur. Kurulum çalışmaları ve deneme ölçümlerinden sonra cihaz ölçümlere hazır hale getirilmiştir. Yapılan tüm ölçümler bu program seçeneği kullanılarak yapılmıştır.

İşletmelerde toz ölçümleri için yapılan ön hazırlık ve süreç planlamalarında yöneticilerin görüşleri alınarak, en doğru verileri elde etmek için, ortalama iş yoğunluğunun en uygun olduğu süreçlerde ölçümler yapılmıştır.

İşletmelerde toz ölçümlerine başlamadan önce çalışanlara cihazın kısa bir tanıtımı yapılmış ve cihazın nasıl çalıştığı hakkında bilgiler verilmiştir. Ardından toz ölçüm cihazının adaptörü her bir işletmede mesleki deneyime sahip bir çalışanın bel bölgesindeki kemere, cihazın algılayıcısı ise değerlerin en doğru şekilde alınması için ağız-burun bölgesine 20 cm'den uzak olmayacak şekilde ve omuz hizasındaki en yakın mesafeye bağlanmıştır (Şekil 1b).



a: Toz Ölçüm Cihazı



b: Cihazın Çalışana Bağlanması

**Şekil 1.** Toz ölçüm cihazı ve uygulama şekli

Bu işlemlerden sonra; toz ölçümü yapılacak işletmelerdeki makine çeşitliliğine göre her işletme için ayrı ayrı olmak üzere, dördü makinelerin başında çalışırken, birisi de mekânın genelinden olmak üzere 5 farklı alanda 15'er dakikalık ölçümler yapılarak (20 farklı işletmede x 5 farklı alanda) toplam 100 ölçüm alınmıştır. Her bir ölçümden sonra cihaz çalışanların üzerinden çıkartılıp, veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ayrıca her ölçümden önce cihazda sıfırlama işlemi yapılmıştır.

İşletmelerde yapılan ölçümlerin toplam süresi ( $100 \times 15\text{dk} = 1.500\text{dk}$ ) olmuş, saniyede bir alınan veriler sonucunda ( $1.500\text{dk} \times 60\text{sn} = 90.000$ ) veri elde edilmiştir. Her bir ölçüm sonunda anlık maksimum veriler ve ölçüm ortalama verileri alınarak tablolara dönüştürülmüş ve o ölçüm için kullanacak veriler bu şekilde oluşturulmuştur.

Araştırma kapsamına alınan her bir işletmeden 1 kişi olmak üzere toplam 20 çalışanın katkılarıyla elde edilen toz ölçümlerinden ve ortam gözlemlerinden oluşan araştırma verileri 2019 yılı Ocak- Nisan ayları arasında toplanmıştır.

### 2.3. İstatistiksel Analizi (Statistical Analysis)

Araştırma kapsamına alınan işletmelerde, toz ölçüm cihazına (TSI SIDEPAK AM 510) kaydedilen toz emisyon ölçüm verileri, cihazın AM510 Aerosol monitörü bilgisayara bağlanarak ve "Software" programı kullanılarak dijital ortama aktarılmıştır. Daha sonra, işletme büyüklüğüne, işletmede işlenen malzeme türüne ve kullanılan makinelere göre ölçümü yapılan toz emisyon miktarının etkisini incelemek için Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) tekniği kullanılmıştır. Analizde anlamlı bulunan varyans kaynaklarını karşılaştırmak için araştırma verileri grafik olarak ifade edilmiştir. Yapılan analizlerde "Microsoft Excel" programı ve SPSS-15 (Statistical Package for the Social Sciences) programı kullanılmıştır.

### 3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, ağaç malzeme ve kompozit panel malzeme işleyen işletmeler araştırma kapsamına alınmış olup, çalışanların maruz kaldığı toz emisyonlarının ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, işletmelerin genel görünümü, fiziki koşulları, ısıtma ve havalandırma sistemleri irdelenerek, tozun oluşumu ve sonraki süreçler üzerindeki etkileri belirtilmiştir. Araştırma bulguları işletme büyüklüklerine, üretimde kullanılan malzemelere ve makinelere göre sırasıyla aşağıda ele alınmıştır.

İlk olarak, küçük ve orta ölçekli işletmelerden elde edilen toz ölçüm sonuçları analiz edilerek gerekli karşılaştırmalar yapılmış olup, sonuçta işletme büyüklüğüne göre ölçümü yapılan toz emisyon değerleri arasında farklılıklar olup olmadığı belirlenmiştir. İşletmelerin büyüklüklerine göre ölçüm ortalamaları Tablo 3’de verilmiştir. Araştırma yapılan orta ölçekli işletmelerin tümünde kuru toplayıcı toz emisyon sisteminin (TES) bulunduğu, küçük ölçekli işletmelerde ise bulunmadığı görülmektedir.

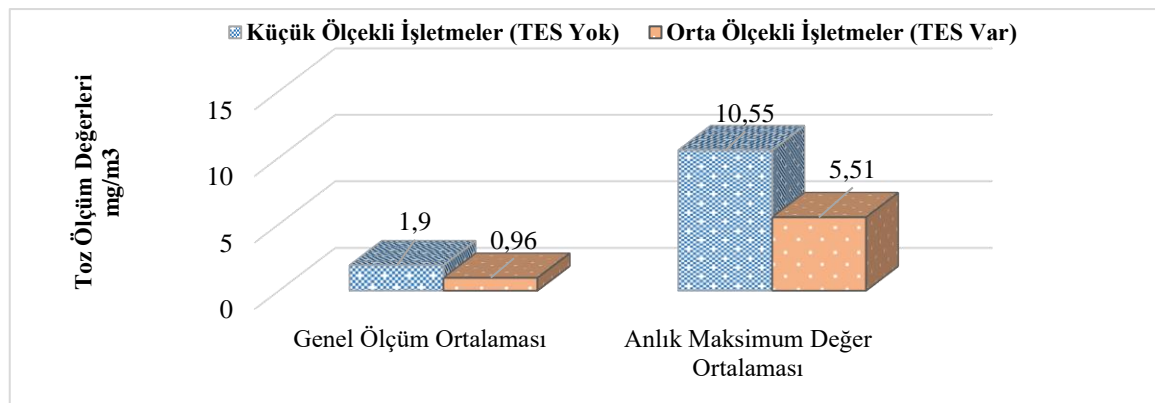
**Tablo 3.** İşletmelerin büyüklüklerine göre toz emisyon ölçüm değerleri

Bağımlı Değişkenler	Küçük Ölçekli İşletmeler		Orta Ölçekli İşletmeler		ANOVA Testi Sonuçları		
	M	SD	M	SD	F	df	Sig.
Ortalama Değerler (mg/m <sup>3</sup> )	<b>1,90</b>	0,78	<b>0,96</b>	0,26	12,919	1	0,002*
Maksimum Değerler (mg/m <sup>3</sup> )	10,55	4,66	5,51	3,03	8,210	1	0,010 *

Not: M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

\*P < 0,05 düzeyinde önemlidir.

Tablo 3’de verilen 15 dakikalık ölçüm ortalamalarına göre, hem küçük hemde orta ölçekli işletmelerden elde edilen toz emisyon ölçüm değerlerinin, 5mg/m<sup>3</sup> sınır değerinin altında kaldığı görülmektedir. Fakat anlık ölçülen en yüksek veriye göre, her iki işletme türünde de sınır değerlerin aşıldığı tespit edilmiştir. Analizler sonucunda tüm işletmelerin ortalama toz ölçümleri 1,43 mg/m<sup>3</sup>, anlık maksimum verilerde ise 14,15 mg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, toz emme sistemine sahip orta ölçekli işletmelerde toz ölçüm ortalamalarının toz emme sistemine sahip olmayan küçük ölçekli işletmelere göre daha düşük düzeylerde kaldığı söylenebilir. Yapılan ANOVA testi sonucuna göre, küçük ve orta ölçekli işletmelerin belirlenen toz ölçüm ortalama değerleri ve anlık maksimum ölçüm değerleri arasında istatistiksel olarak p<0,05 düzeyinde anlamlı farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, toz emme sistemlerinin işletmelerin toz ölçüm ortalamalarını olumlu yönde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. İşletmelerde bulunan toz emme sistemlerinin toz ölçüm oranlarına etkisi Şekil 2’de verilmiştir.



**Şekil 2.** İşletmelerin büyüklüklerine göre toz emisyon ölçüm değerleri

Şekil 2’de toz emme sistemine sahip olan orta ölçekli işletmelerin toz ölçüm değerlerinin belirgin olarak düşük kaldığı görülmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere, işletmelerde yapılan ölçüm ortalamaları sınır değerlerin (5mg/m<sup>3</sup>) altında çıkmış olsa da anlık maksimum ölçüm değerlerinin yüksek olması dikkat çekicidir. Diğer bir sonuçta, ağaç malzeme ve kompozit panel malzeme işleyen işletmelerin toz emisyon ölçüm ortalama değerleri arasındaki farklılıklar Tablo 4’de verilmiştir.

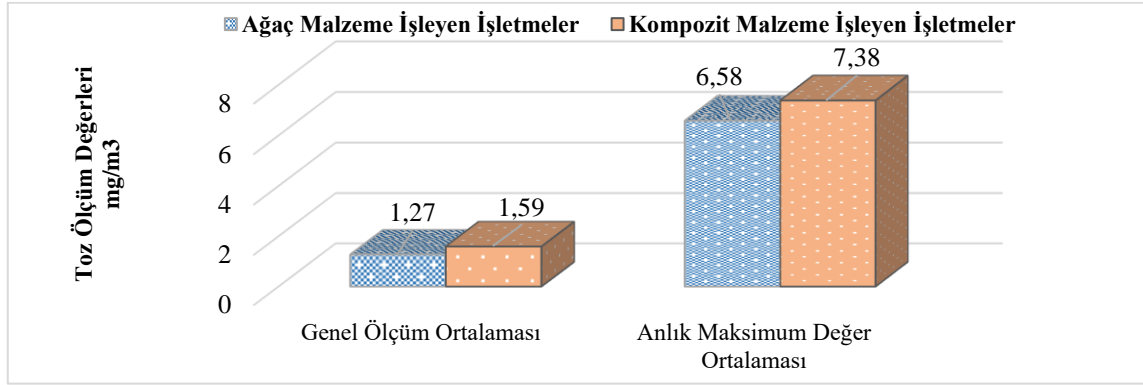
**Tablo 4.** İşletmelerin işlediği malzemeye göre toz emisyon ölçüm değerleri

Bağımlı Değişkenler	Ağaç İşleyen İşletmeler		Kompozit İşleyen İşletmeler		ANOVA Testi Sonuçları		
	M	SD	M	SD	F	df	Sig.
Ortalama Değerler (mg/m <sup>3</sup> )	1,27	0,44	1,59	0,91	3,883	1	0,052*
Maksimum Değerler (mg/m <sup>3</sup> )	6,58	2,45	7,38	4,07	0,948	1	0,333 <sup>ns</sup>

Not: M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

\*P < 0,05 düzeyinde önemlidir. ns: P < 0,05 düzeyinde önemsizdir.

Tablo 4'e göre, ağaç malzeme işleyen işletmelerdeki toz ölçüm ortalamalarının, kompozit panel malzeme işleyen işletmelere göre daha düşük düzeyde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, ağaç malzeme işleyen işletmelerde toz ölçüm ortalamalarının, kompozit panel malzeme işleyen işletmelere göre daha düşük düzeylerde kaldığı söylenebilir. Yapılan ANOVA testi sonucuna göre, iki farklı malzeme işleyen işletmelerin belirlenen toz ölçüm ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak p < 0,05 düzeyinde anlamlı bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. Fakat iki farklı malzeme işleyen işletmelerin belirlenen anlık maksimum ölçüm değerleri arasında istatistiksel olarak p < 0,05 düzeyinde anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Bu sonuçlar, üretimde kullanılan ağaç malzemenin işletmelerin toz ölçüm ortalamalarını olumlu yönde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. İşletmelerde kullanılan iki farklı malzemenin toz ölçüm oranlarına etkisini daha net bir şekilde ifade etmek için hazırlanan grafik Şekil 3'de verilmiştir.

**Şekil 3.** İşletmelerin işlediği malzemeye göre toz emisyon ölçüm değerleri

Şekil 3'de ağaç malzeme işleyen işletmelerin toz ölçüm değerlerinin belirgin olarak düşük kaldığı görülmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere, işletmelerde yapılan ölçüm ortalamaları sınır değerlerin (5mg/m<sup>3</sup>) altında çıkmış olsa da anlık maksimum ölçüm değerlerinin yüksek olması dikkat çekicidir.

Bir başka sonuçta da, işletmelerin kullandığı makinelere göre toz emisyon ölçüm ortalama değerleri arasındaki farklılıklar Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5.** İşletmelerin kullandığı makinelere göre toz emisyon ölçüm değerleri

Bağımlı Değişkenler	Ortalama Değerler (mg/m <sup>3</sup> )		Maksimum Değerler (mg/m <sup>3</sup> )		ANOVA Testi Sonuçları		
	M	SD	M	SD	F	df	Sig.
Şerit Testere Makinesi	1,23	0,60	3,78	3,06	13,439	1	0,001*
Daire Testere Makinesi	1,32	0,66	4,47	3,75	13,645	1	0,001*
Planya Makinesi	1,44	0,66	4,24	2,50	23,562	1	0,000 *
Freze Makinesi	1,78	1,21	5,11	4,59	9,868	1	0,000 *

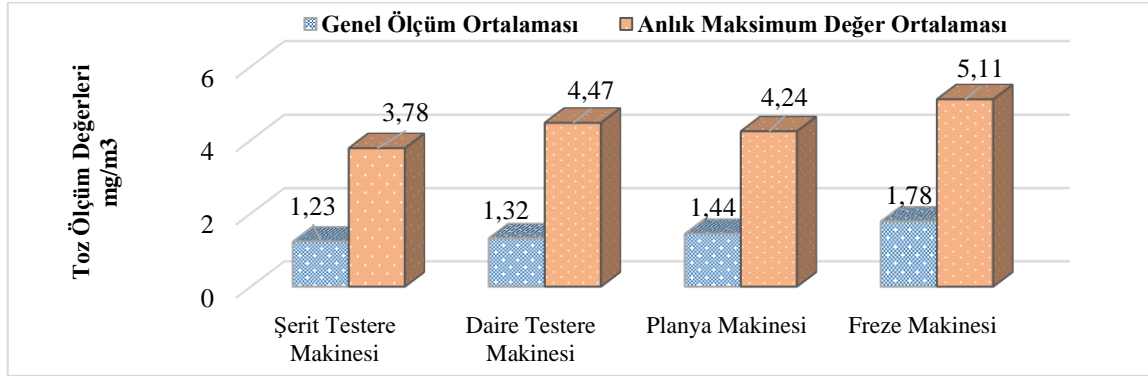
Not: M: Ortalama değer, SD: Standart sapma, F: F değeri, df: Serbestlik derecesi.

\*P < 0,05 düzeyinde önemlidir.

Tablo 5'e göre, ölçüm verileri en düşük ortalama değerden, en yüksek ortalama değere doğru; şerit testere makinesi 1,23 mg/m<sup>3</sup>, daire testere makinesi 1,32 mg/m<sup>3</sup>, planya makinesi 1,44 mg/m<sup>3</sup> ve freze makinesi 1,78 mg/m<sup>3</sup> şeklinde sıralandığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek ortalama toz ölçüm değeri freze makinesinde ölçülmüştür. ağaç malzeme işleyen işletmelerdeki toz ölçüm ortalamalarının, kompozit panel malzeme işleyen işletmelere göre daha düşük düzeyde olduğu görülmektedir. Yapılan ANOVA testi sonucuna göre, herbir makineden elde edilen genel ortalama değerler ile anlık maksimum en yüksek



ortalama değerler arasında istatistiksel olarak  $p < 0,05$  düzeyinde anlamlı bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. İşletmelerde kullanılan farklı makinelerin toz ölçüm oranlarına etkisini daha net bir şekilde ifade etmek için hazırlanan grafik Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. İşletmelerin kullandığı makinelere göre toz emisyon ölçüm değerleri

Şekil 4’de freze makinesine göre şerit testere makinesinin genel toz ölçüm değerinin daha düşük kaldığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, mobilya üreten işletmelerde çalışanların, ağaç ve kompozit panel tozlarına maruz kalma seviyeleri ölçülmüş ve tozların insan üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan ölçümlerde işletme büyüklükleri, işletme türleri, kullanılan makine çeşitlilikleri, havalandırma sistemleri, çalışma süreleri gibi faktörlerin toza maruz kalma seviyeleri üzerinde tekli ve çoklu etkilerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tüm bu değişkenler birlikte ve ayrı ayrı değerlendirilip anket sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, insan sağlığı üzerinde çeşitli etkilerinin olabileceği düşünülerek, iş sağlığı ve güvenliği anlamında gerekli önlemlerin alınmasında fayda olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Mobilya üreten işletmelerdeki genel ölçümlerin ortalama değerleri  $1,43 \text{ mg/m}^3$  olarak tespit edilmiş, anlık maksimum değer olarak  $19,46 \text{ mg/m}^3$  oranında değerlere ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple, toz ölçümlerinde konsantrasyon süreleri, işlem yapılan makine türü, işletme büyüklüğü, işlenen malzeme çeşitliliği ve havalandırma sistemlerine bağlı olarak, toz oranlarında ciddi değişimler olacağı sonucuna varılmıştır.

İşletme büyüklüklerine göre veriler analiz edildiğinde, işletme büyüklüğü arttıkça toza maruz kalma seviyelerinde düşüşler olmaktadır. Bu durumda toz ölçümleri, küçük ölçekli işletmelerde genel ortalama olarak  $1,89 \text{ mg/m}^3$ , orta ölçekli işletmelerde ise  $0,96 \text{ mg/m}^3$ ’tür. Anlık maksimum ölçüm değerleri ise  $5,0 \text{ mg/m}^3$  sınır değerinin çok üstünde ve küçük ölçekli işletmelerde  $19,46 \text{ mg/m}^3$ , orta ölçekli işletmelerde ise  $11,52 \text{ mg/m}^3$ ’tür. Ölçülen anlık maksimum değerler de yine işletme büyüklükleri arttıkça düşüş göstermiştir.

İşlenen malzeme türüne göre ölçülen en yüksek toz oranları kompozit panel işleyen işletmelerdedir ve bu işletmelerin ortalaması  $1,58 \text{ mg/m}^3$ ’tür. Ağaç işleyen işletmelerde ise bu ortalama  $1,27 \text{ mg/m}^3$  tür. Rosenberg ve ark. [29], taze odun kesilirken meydana çıkan odun tozu ve monoterpenerin çalışanlara verdiği zararı araştırmışlardır ve bu çalışmada  $0,5 \text{ mg/m}^3$  ile  $2,2 \text{ mg/m}^3$  aralığında çalışmamızı destekler nitelikte sonuçlara ulaşılmıştır. Yine anlık maksimum değerlere bakıldığında, her iki işletme türünde de sınır değerlerin üstünde toz ölçüm sonuçlarına rastlanmıştır. Fakat ağaç işleyen işletmelerdeki anlık maksimum veri değerleri  $19,46 \text{ mg/m}^3$ , kompozit işleyen işletmelerde bu oran  $11,52 \text{ mg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Anlık maksimum veri değerlerinde genel ölçüm ortalamalarından farklı bir sonuçla karşılaşılmıştır. Bunun sebebi ise işletmelerde kullanılan makinaların durumu, ısıtma sistemleri, sigara kullanımı gibi değişkenlerden kaynaklı olabileceği düşünülmekte olup bu değişkenlerde sabit tutularak yeni çalışmalar yapılması yararlı olacaktır.

Makinelerde yapılan toz ölçümleri sırasıyla 1,22 mg/m<sup>3</sup> ortalama ile şerit testere makinesi, 1,31 mg/m<sup>3</sup> ile daire testere makinesi, 1,43 mg/m<sup>3</sup> ile planya makinesi ve 1,77 mg/m<sup>3</sup> ile freze makinesi takip etmiştir. İşlem yapılan makinelerdeki kesici türleri, kalınlıkları, kesme derinlikleri gibi değişkenlerin farklı toz ölçüm oranlarına neden olacağı göz ardı edilmeden, bu değişkenler de dikkate alınarak yeni çalışmalar yapılması yararlı olacaktır.

İşletmelerde kullanılan toz emisyonu ve havalandırma sistemlerine bakıldığında toz emisyonu olan işletmelerdeki toz ölçüm ortalamalarında 2-3 katı oranında düşüşler oluşmaktadır. Toz emisyonu olan işletmelerde ölçülen ortalama toz miktarı 0,97 mg/m<sup>3</sup>, toz emisyonu olmayan işletmelerde ise bu ölçüm ortalaması 2,08 mg/m<sup>3</sup>'tür. Anlık maksimum veri ortalamalarında da yine bu havalandırma sistemlerinin varlığı ile doğru orantılı olarak düşüşler tespit edilmiştir. Sönmez ve ark. [21], tarafından Ankara'da mobilya sektöründe faaliyet gösteren işletmelerde yapılan anket çalışması da çalışmamızı destekler nitelikte ve işletme büyüklükleriyle ilişkili olarak anlamlı sonuçlar bulmuşlardır. Ayrıca, toz emme sistemlerinin çeşitliliği arttıkça, toza maruz kalma değerlerinde düşüşler olduğu görülmüştür.

Ayrıca, mobilya üreten işletmelerde kullanılan doğal havalandırma, aspiratör vb. sistemler, mekân içerisindeki tozu olduğu gibi dışarıya atmaktan başka bir işlem görmemektedir. Bu sistemlerin dışarıya attığı tozlar da yine dolaylı olarak hava kirliliğine neden olmakta ve çalışanlara zarar vermektedir. Tüm bu zararlı etkilerin minimuma indirilmesi için güncel havalandırma sistemlerinin kullanımına ve geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Gürlevik [28] tarafından Ankara ilinde Sincan Organize Sanayi Bölgesinde havalandırma sistemleri üzerine yaptıkları araştırma da çalışmamızı destekler nitelikte ve havalandırma sistemlerinin toz emisyonunda ciddi etkileri olduğunu belirtmektedir.

Çalışanların toza maruz kalma seviyeleri düşük olsa dahi, tozdan kaynaklı sağlık sorunlarının yaşandığı unutulmamalı ve mobilya üreten işletmelerde açığa çıkan tozun havaya karışmadan emiliminin sağlanacağı sistemler kurulmalıdır. Kurulan bu toz emme sistemleriyle bütünleşmiş bir şekilde toz toplama merkezleri de kurularak, tozun dış ortam havasını kirletmesi önlenmelidir.

İş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin işletmeler tarafından alınmasının hayati önem taşıdığı, iş güvenliği eğitimleri ve hizmet içi eğitimlerle çalışanların bilinçlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Koruyucu donanım kullanma oranlarının artırılarak, bu konuda alışkanlık kazandırılması yönünde çalışmalar yapılmalıdır. Toza maruz kalma seviyesi yüksek olan çalışanlarda rotasyon uygulanarak, yaşanması muhtemel bir takım sağlık sorunları önlenecektir.

İbn-i Sina'nın "eğer toz olmasaydı insan bin yıl yaşardı" sözünden hareketle, sağlığa büyük etkileri olan tozlar emici sistemlerce emilmeli ve tozların zararları konusunda çalışanlar bilgilendirilmelidir. En önemlisi de insana değer veren bir anlayış tüm işletmeler tarafından benimsenmeli ve kültür haline getirilmelidir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akın, H. (2003). *İstanbul'da KOBİ Kapsamındaki Mobilya Üretim İşletmelerinin Yapısal Sorunları ve Çözüm Önerileri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37-38.
- [2] Şen, H. ve Çınar, H. (2017). Mobilya Ürün Yaşam Döngüsünde İş Sağlığı e Güvenliği Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 235-246.
- [3] Sanayi Genel Müdürlüğü. (2013). *Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi*. Mobilya Sektörü Analizi (1).
- [4] Çınar, H. (2005). An Overview of the Furniture Design Education and the Furniture Industry in Turkey, *Eğitim e Bilim* 30.137: 82.
- [5] Çınar, H. (2005). Eco-design and furniture: Environmental Impacts of Wood-Based Panels, Surface and Edge Finishes. *Forest Products Journal*, 55(11), 27-33.
- [6] Özer, K. (2009). Mobilya Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği. *TAIEX Semineri*, Kayseri, Aralık.
- [7] Yıldırım, K, Günçiktı, M, Çelebi Yazıcıoğlu, N. Farklı Sosyo-Ekonomik Düzeye (SED) Sahip

- Konut Kullanıcılarının İç Mekân Donatılarını Değiştirme Süreçlerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (1) , 40-50, (2020).
- [8] Burdurlu, E. (1994). *Ahşap Kökenli Kaplama ve Levha Üretim ve Kullanım Teknolojisi*. Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- [9] Burdurlu, E. (1997). *Mobilya Üretim Süreçlerinde Uçucu Madde Emisyonu, İşçi Sağlığına Etkileri ve Azaltım Yolları*. I. Ulusal Mobilya Kongresi Bildiri Kitabı, 189-200.
- [10] Diworth, M. (2000). *Wood Dust Survey*, Health and Safety Laboratory, New York. 8
- [11] Bozkurt, A. Y., Bozkurt, T. (1979). Ağaç İşleyen Endüstrilerde Sağlık Sorunları. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 60-67.
- [12] Pearson D. (1989). *The Natural House Book*. London: Conran Octopus Limited.
- [13] Shellman, J.M. (1999). Encyclopaedia of Occupational Health and Safety: Chemical, Industries and Occupations. *International Labour Office*, Geneva.
- [14] Ekiz, N. (2009). Türkiye’de Mobilya Sanayi İsg Koşulları Sorunları Ve Çözüm Önerileri. *Mobilya Sektöründe İSG konulu TAIEX Semineri*, Kayseri.
- [15] Çınar, H. (2018). Effects of Temperature and Thickness of Wood Based Boards on Formaldehyde Emission. *Wood Research*, 63(5), 895-908.
- [16] Çınar, H., and Erdoğan, M. (2018). Eco-Design: Effects of Thickness and Time in Service for Wood Based Boards on Formaldehyde Emission. *Forest Products Journal*, 68 (4), 405-413.
- [17] Çınar, H., Öztürk, Y., & Yıldırım, K. (2018). Effects of Surface Veneering, Edge Banding, and Drilling Holes for Handles and Hinges of Wood Based Boards on Formaldehyde Emission. *Forest Products Journal*, 68 (3), 264-271
- [18] Lion, S. H., Yang, J. L., Cheng, S. Y., & Lai, F. M. (1996). Respiratory Symptoms and Pulmonary Function Among Wood Dust-Exposed Joss Stick Workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 68(3), 154-160.
- [19] Leclerc, A., Cortes, M. M., Gérin, M., Luce, D., and Brugère, J. (1994). Sinonasal Cancer and Wood Dust Exposure: Results from a Case-Control Study. *American Journal of Epidemiology*, 140(4), 340-349.
- [20] Okwari, O., Antai, A. B., Owu, D. U., Peters, E. J., and Osim, E. E. (2005). Lung Function Status of Workers Exposed to Wood Dust in Timber Markets in Calabar, Nigeria. *African Journal of Medicine and Medical Sciences*, 34(2), 141.
- [21] Sönmez, A., Arslan, A. R., Ömer, A. S. A. L., Akdere, B. (2009). Ankara’da Mobilya Sektöründe Faaliyet Gösteren Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerde Fiziksel Çevre Koşullarından Ortam Faktörlerinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 12(2).
- [22] Shamssain, M. H. (1992). Pulmonary Function and Symptoms in Workers Exposed o Wood Dust. *Thorax*, 47(2), 84-87.
- [23] Bislimovska, D., Petrovska, S., Minov, J. (2015). Respiratory Symptoms and Lung Function in Never-Smoking Male Workers Exposed to Hardwood Dust. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 3(3), 500.
- [24] Goldsmith, D. F., and Shy, C. M. (1988). Respiratory Health Effects from Occupational Exposure to Wood Dusts. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1-15.
- [25] Holmström, M., and Wilhelmsson, B. O. (1988). Respiratory Symptoms and Pathophysiological

- Effects of Occupational Exposure to Formaldehyde and Wood Dust. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 306-311.
- [26] Osman, E., and Pala, K. (2009). Occupational Exposure to Wood Dust and Health Effects on the Respiratory System in a Minor Industrial Estate in Bursa/Turkey. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 22(1), 43-50.
- [27] Semerci, N. T. (2014). *Kızılçam İşleyen Kereste Fabrikalarında İş Sağlığı Problemleri*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [28] Gürlevik, T. (2016). *Mobilya Sektöründe Ağaç Tozu Maruziyetinin Önlenmesinde Endüstriyel Havalandırma Tasarımı*. Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı Ve Güvenliği Uzmanlık Tezi.
- [29] Rosenberg, C., Liukkonen, T., Kallas-Tarpila T., Ruonakangas A., Ranta R., Nurminen, M., Welling I., Ja Èppinen P. (2002). Monoterpene and Wood Dust Exposures: Work-Related Symptoms Among Finnish Sawmill Workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 38-53.
- [30] Barcenas, C. H., Delclos, L.G., El-Zein, R., Tortolero-Luna, G., Whitehead, L. W., Spitz, M. (2005). Wood Dust Exposure and the Association with Lung Cancer Risk. *American Journal of Industrial Medicine*, 349-357.
- [31] Douwes, J., McLean, D., Slater, T., Pearce, N. (2001). Asthma and Other Respiratory Symptoms in New Zealand Pine Processing Sawmill Workers, *American Journal Of Industrial Medicine*, 608-615.
- [32] Innos, K., Rahu M., Rahu K., Lang I., Leon D. A. (2000). Wood Dust Exposure and Cancer Incidence, a Retrospective Cohort Study of Furniture Workers in Estonia. *American Journal of Industrial Medicine*, 501-511.

## Energy-Efficient Facade and Biomimicry in Architecture

 Emine GÜNDOĞDU  H. Derya ARSLAN\* 

Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Architecture, 42090, Meram/KONYA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 24/09/2020

Revision: 27/10/2020

Accepted: 27/10/2020

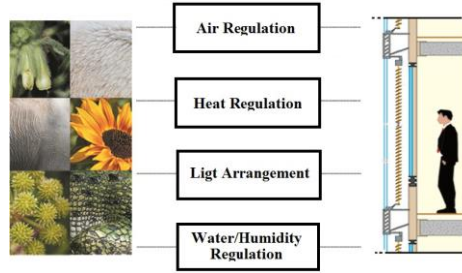
#### Highlights

- Energy efficiency in building design.
- Biomimetic façade systems.
- Sustainable solutions.

#### Keywords

 Biomimicry  
 Energy efficient facade design  
 Sustainability

Energy requirements in the design, construction and use of buildings have a major impact on the consuming of energy resources. For this reason, it is important to build buildings in a way that is least harmful to the environment and energy efficient. The façade, which is the first surface where the building communicates with the external environment, is the part that affects energy usage the most.



**Figure A.** Basic principles for energy efficiency in building facades

**Purpose:** The main aim of this study is to find the answer of the question; “Can solutions for providing energy efficiency in building facade systems be designed by taking inspiration from the systems in nature?”

**Theory and Methods:** The methods of providing these energy efficient solutions (efficiency, protection, production, etc.) of biomimetic façade systems inspired by nature have been examined through the sample projects identified. Following the required literature review, five examples of projects with different features were examined. At each project inspired by different organisms; firstly, it has been analyzed how organisms develop air, water/moisture, heat, and light regulation strategies through structure, skin, surface or layer. It was determined that these strategies are transferred to the facade systems at which level and approach of biomimicry. In biomimetic façade systems, it was determined at which level these strategies are used in the system and what type of façade system was used. After the energy efficient solutions provided by the system in line with the determined principles were analyzed one by one, the projects were evaluated with a comparative table in line with these principles.

**Results:** As a result of the evaluation, it has been determined that energy efficient facade systems can be designed with sustainable, innovative and alternative solutions offered by the biomimetic approach. In addition, it has been observed that energy efficiency is achieved by producing solutions for air and water regulation with especially heat and light regulation, in biomimetic facade systems.

**Conclusion:** When designing energy efficient facade systems, biological solutions should be well defined and integrated into the design according to the problems experienced in the creation of facade designs. In addition, in order to obtain more reliable and clear data, it is recommended that biomimetic project analysis be performed with energy simulation programs and energy performance calculation methods.



GU J Sci, Part C, 8(4): 922-935 (2020)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Mimaride Enerji Etkin Cephe ve Biyomimikri

Emine GÜNDOĞDU H. Derya ARSLAN\*

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 42090, Meram/KONYA

### Öz

Bu çalışmada “Bina cephe sistemlerinde enerji etkinliği sağlamaya yönelik çözümler doğadaki sistemlerden ilham alınarak tasarlanabilir mi?” sorusuna yanıt bulunması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda doğal varlıkların, doğal derilerin, bir cephe sisteminin enerji etkinliğini en çok etkileyen hava, ısı, ışık, su ilkeleri doğrultusundaki çözümleri incelenmiştir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında biyomimetik yaklaşımın cephe tasarımlarında nasıl enerji etkin çözümler ürettiği araştırılmıştır. Bu kapsamda doğadan esinlenen biyomimetik cephe sistemlerinin enerji etkin çözümleri (verimlilik, koruma, üretme vb.) sağlama yöntemleri belirlenen örnek projeler üzerinden incelenmiştir. Gerekli literatür taramasının ardından farklı özelliklere sahip beş proje enerji etkin cephe tasarımında etken hava, su, ısı, ışık düzenleme ilkeleri ile geliştirilen tablo aracılığı ile doğadan esinlenen varlığın, canlılığın, yapısı, cildi, derisi, yüzey veya tabakası gibi etkileşim stratejileri üzerinden analiz edilmiştir. Bu stratejilerin, cephe sistemlerine biyomimikrinin hangi seviyesinde ve yaklaşımında aktarıldığı tespit edilmiştir. Sistemin belirlenen ilkeler doğrultusunda sağladığı enerji etkin çözümler tek tek analiz edildikten sonra bu ilkeler doğrultusunda karşılaştırmalı bir tablo üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda biyomimetik yaklaşımla sürdürülebilir, yenilikçi ve alternatif çözüm önerileri ile enerji etkin cephe sistemlerinin tasarlanabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca biyomimetik cephe sistemlerinde ısı ve ışık düzenlemesi başta olmak üzere hava ve su düzenlemelerine yönelik çözümler üretilerek enerji etkinliğinin sağlandığı görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 24/09/2020  
Düzeltilme: 27/10/2020  
Kabul: 27/10/2020

### Anahtar Kelimeler

Biyomimikri,  
Enerji etkin cephe  
tasarımı,  
Sürdürülebilirlik

### Keywords

Biomimicry,  
Energy efficient facade  
design,  
Sustainability

## Energy-Efficient Facade and Biomimicry in Architecture

### Abstract

In this study, it is aimed to find the answer of the question; ‘Can solutions for providing energy efficiency in building facade systems be designed by taking inspiration from the systems in nature?’. Based on this main question in the study, the solutions of natural beings, natural skins within the framework of the principles of air, heat, light, water/moisture regulation that most affect the energy efficiency of a facade system were examined. In this context, the aim of the study is to demonstrate how biomimetic approach produces energy efficient solutions in facade designs. In line with this purpose, the methods of providing these energy efficient solutions (efficiency, protection, production, etc.) of biomimetic façade systems inspired by nature have been examined through the sample projects identified. Following the required literature review, five examples of projects with different features were examined. At each project inspired by different organisms; firstly, it has been analyzed how organisms develop air, water/moisture, heat, and light regulation strategies through structure, skin, surface or layer. It was determined that these strategies are transferred to the facade systems at which level and approach of biomimicry. In biomimetic façade systems, it was determined at which level these strategies are used in the system and what type of façade system was used. After the energy efficient solutions provided by the system in line with the determined principles were analyzed one by one, the projects were evaluated with a comparative table in line with these principles. As a result of the evaluation, it has been determined that energy efficient facade systems can be designed with sustainable, innovative and alternative solutions offered by the biomimetic approach. In addition, it has been observed that energy efficiency is achieved by producing solutions for air and water regulation with especially heat and light regulation, in biomimetic facade systems.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Binaların tasarımı, yapımı, kullanımı ve dönüşümü sürecinde yani yaşam döngüleri boyunca oluşan kirlilik, bu süreçte kullanılan enerji gereksinimleri nedeniyle, enerji kaynaklarının tükenmesinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle binaların yapımında çevreye en az zarar verecek şekilde ve enerji etkin tasarımlar yapmak önemlidir. Binanın dış ortamla iletişim kurduğu ilk yüzey olan cephe, enerji kullanımını en çok etkileyen bölümdür.

İç ve dış ortam arasındaki ara yüz olan bina kabuğu, binanın enerji etkin olmasını sağlama yönünde önemli bir rol oynar. Binanın dış ortam ile doğrudan temas halinde olan katmanı olması sebebiyle başta havalandırma, ısıtma, aydınlatma, nem kontrolü ve diğer birçok işlev için kullanıcı konforunu sağlamak amacıyla tüketilen enerjinin azaltılmasında büyük etkiye sahiptir. Yapıda en büyük alana sahip olan ve yenilenebilir enerji kaynakları (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi) ile doğrudan temas halinde olan cephe sistemleri ve teknolojinin sağladığı olanaklarla birlikte enerjinin etkin kullanımı sağlanabilmektedir. Literatürde enerji etkin cephe sistemleri incelenerek, bu sistemlerdeki mevcut çözümler üzerinden enerji etkinliği sağlayan temel ilkeler belirlenmiştir [1-2]. Ayrıca son yıllarda doğal varlıkların, organizmaların, bu ilkeler doğrultusunda enerji etkinliği sağlamaya yönelik çözümlerinde ele alındığı çalışmalar mevcuttur [3-4]. Ekolojik bina cephesi yada enerji etkin bina cephesi tasarımlarında doğanın çözümlerini kullanarak öne çıkan yaklaşımların baz alındığı pek çok paradigma göze çarpmaktadır. Bu bağlamda farklı disiplinlerde temeli doğanın çözümlerine dayanan, biyo-esin (*Bioinspiration*), biyomimikri (*Biomimicry*), biyomimetik (*Biomimetic*), biyonik (*Bionic*), biyofili (*Biophilia*), biyomorfik (*Biomorphic*) gibi terimlerle karşılaşılmaktadır. Bu terimler arasında biyomimikri daha ekolojik ve çevreci çözümler için doğaya bakma noktasında özelleşmiştir. Ancak öncesinde 1950'lerde Otto Schmitt tarafından biyomimetik terimi, 1960'da Jack Steele tarafından biyonik terimi kullanılmıştır. Biyomimikri terimi ise ilk olarak 1962' de bilimsel literatürde ortaya çıkmış ve özellikle 1980'lerde malzeme bilimciler arasında kullanımı yaygınlaşmıştır. Literatürde biyomimikri ve cephe tasarımına yönelik farklı çalışmalar mevcuttur [5-6].

Bu çalışmada ise “Bina cephe sistemlerinde enerji etkinliği sağlamaya yönelik çözümler doğadaki sistemlerden ilham alınarak tasarlanabilir mi?” sorusunun cevabı; biyomimikrinin cephe tasarımında enerji etkin çözümlere katkısını hava, ısı, ışık, su/nem düzenleme ilkeleri üzerinden (cephede enerji etkinliği sağlamaya yönelik ilkeler) ele alınarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ve araştırma problemi doğrultusunda ilk olarak cephenin yapıdaki konumuna, cephenin işlevlerine, tasarımını etkileyen faktörlere, cephe sisteminin parçalarına değinilmiştir. Sonrasında mevcut enerji etkin cephe sistemleri ve tasarımlarını etkileyen temel ilkeler (hava, ısı, ışık, su/nem düzenleme ilkeleri) ele alınmıştır. Doğanın stratejilerinin enerji etkin tasarıma etkisini gözlemleyebilmek için neden biyomimikri yaklaşımı seçildiği, biyomimikri seviyelerine, yaklaşımlarına ve biyomimikrinin tarihsel gelişimine de kısaca yer verilmiştir. Sonrasında geliştirilen metodoloji ile enerji etkin cephe sistemleri ve biyomimikri arasında ilişki kurulmuştur ve saptanan veriler doğrultusunda araştırmanın yöntemi olan analiz tablosu oluşturulmuştur. Bu yöntemle, farklı canlılardan esinlenerek tasarlanmış, tasarım önerisi olarak geliştirilmiş, prototip olarak üretilmiş veya uygulanmış biyomimetik cephe sistemlerinin detaylı olarak enerji etkinlik (verimlilik, koruma, üretme vb.) analizleri yapılmıştır. Analizleri yapılan projelerin karşılaştırmalı nitel değerlendirme tablosu hazırlanmıştır.

## 2. ENERJİ ETKİN CEPHE TASARIMI VE BİYOMİMİKİRİ (ENERGY EFFECTIVE FACADE DESIGN AND BIOMIMICRY)

### 2.1. Enerji Etkin Cephe Sistemleri (Energy Effective Facade Systems)

Yapıda en büyük alana sahip olan ve yenilenebilir enerji kaynakları ile doğrudan temas halinde olan (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi) cephe sistemlerinde teknolojinin sağladığı olanaklarla birlikte enerjinin etkin kullanımı sağlanabilmektedir. Cepheler pek çok işleve sahiptir. Cephe sistemleri, bu enerji gerektiren işlevleri yerine getirirken ve yapının yaşam döngüsü sürecinde harcanan enerjide belirli bir paya sahip olmakla birlikte, bu süreçte binanın kullanımı aşamasında özellikle termal konforun sağlanması noktasında harcanan enerjiyi belirleyen en etkin bina sistemidir. Bu doğrultuda tüketilen enerjiyi minimumda tutan bina için gerekli enerji üretimine katkı sağlayan cepheler tasarlamak günümüzde mimarlar için yapı tasarımında etkili en önemli faktörlerden biri olarak yerini almıştır. Bu nedenle yapının bulunduğu çevre koşullarında iç ortam ve dış ortam arasında sınır görevi üstlenip iletişimi sağlayan cephelerin, yapılarda

enerji etkinliğini sağlaması yönündeki rolünü inceleyen pek çok çalışma yapılmaktadır. Bina cepheleri aracılığı ile enerji etkinliği; cephe sistemi tabaka sayısı, cephelerin doluluk boşluk oranları, cepheyi oluşturan alt sistemlerin-kapı, pencere gibi sistemlerin yalıtımı, cephede kullanılan malzemelerin enerji etkin özellikleri, bir bütün olarak cephe sisteminin enerji üretimi korunumu ve enerjiyi verimli kullanabilmesi gibi özelliklerle sağlanabilmektedir. Cephe sistemleri; kullanılan malzeme, strüktür türü gibi farklı cephe bileşenlerinin özelliklerine göre ya da yapım amaç ve tekniklerine göre farklı şekillerde adlandırılmaktadır. Bunlardan bazıları biyomimetik cephe, kinetik cephe, akıllı cephe, interaktif cephe, duyarlı cephe, değiştirilebilir cephe vb. gibidir. Belirtilen sistemler genellikle enerjinin verimli kullanıldığı sistemlerdir. Doğanın enerji etkin çözümlerinden faydalanılması noktasında, doğaya her açıdan geniş bir perspektifle bakan biyomimikrinin cephe sistemleri için optimum enerji etkin çözümler sağlayacağı hipotezi ile bu çalışma kapsamında biyomimetik cepheler incelenmiştir. Hipotez doğrultusunda, ‘Doğanın stratejileri enerji etkin cephe tasarımına nasıl etki eder?’ sorusu üzerinden tez kapsamında belirlenen doğadan esinlenme stratejisi olarak biyomimikri terimi ön plana çıkmaktadır.

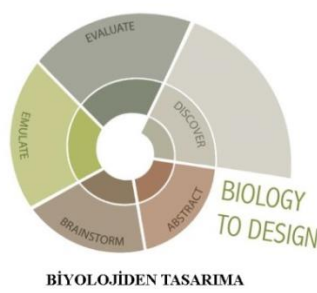
## 2.2. Biyomimikri (Biomimicry)

Doğa, milyarlarca yıldır kendini devam ettirmeyi başarmıştır. Doğada insanoğlunun çözmeye çalıştığı birçok sorun hâlihazırda çözülmüş durumdadır, önemli olan insanların aradıkları çözüm için doğaya bakmalarıdır [7]. Bu özellikleri nedeniyle geçmişten günümüze insanoğlunun çevresinde gördüklerini nasıl kendine yararlı hale getirdiğini, doğadan esinlenen örnekleri incelediğimizde görmek mümkün olacaktır. M.Ö. 400 yılında antik Yunan filozofu Demokritos doğadan esinlenmeyi hayvanlar üzerinden açıklamış; örümcekten giysi dokumayı, kırlangıçlardan ev inşa etmeyi, kuşlardan şarkı söylemeyi öğrenme şeklinde ifade etmiştir [8]. Kazılardan çıkan obje ve oluşumlar incelendiğinde o dönemde yaşayan insanların bulunduğu çevrenin iklimsel şartları, doğanın özellikleri anlaşılabilir. Buradan yola çıkarak doğadan örnek alınarak yapılan araç ve gereçlerin çoğunun, insanların kendilerini koruma amacı ile yapmış olduğu görülmektedir. Bu nedenle vahşi hayvanlardan, zorlu iklimsel şartlardan korunmak amacıyla barınaklar yapmışlardır. Bunu bazen kuş yuvaları gibi çalı çırpı kullanarak, bazen de mağarada yaşayan hayvanları örnek alarak yapmışlardır. Endüstri devrimiyle insanların gözlem araçları ve üretim olanakları gelişmiştir. Sonrasında ise teknolojinin de gelişmesiyle birlikte, doğanın sahip olduğu özellikleri ve doğadaki malzemelerin ve formların ihtiyaç duyulan sağlamlık, hafiflik, dinamik ve statik yüklere dayanıklılık, enerji korunumu sağlayan formel ve yapısal özellikleri, sessizlik, kendini onarabilme gibi özelliklerinin gözlemlenmesi, çözümlenmesi ve modellenmesi birçok bilim insanının dikkatini doğadaki canlı ya da cansız oluşumlara yöneltmiştir [9]. Bu nedenle geçmişten günümüze farklı disiplinlerde pek çok doğa esinli tasarımlar yapılmıştır.

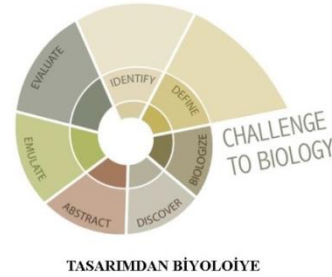
Biyomimikri literatürde, mimarların sürdürülebilir tasarıma yönelik geleneksel yaklaşımların ötesine geçmesine ve ihtiyacımız olan dönüştürücü çözümleri sunmasına olanak tanıyan, tasarımcıların yerel çevreyi projelerine entegre etmeleri için daha sürdürülebilir bir yapı ve yaşam biçimini destekleyen, ekolojik tasarımı ve teknolojik yeniliğe olan ilgiyi içeren bütünsel yaklaşım, doğanın dehasını kullanan güçlü bir inovasyon aracı olarak tanımlanmıştır [10]. Buradan yola çıkarak biyomimikri, insanlığın problemlerine doğada bulunan oluşumları, dokuları ve stratejileri gözlemleyip taklit ederek herhangi bir disiplinde tasarlanan ürünlere sürdürülebilir çözümler getiren bir bilim dalı olarak tanımlanabilir. Zari (2018) [11]’ e göre tasarım probleminin çözümü noktasında doğa üç seviyede taklit edilmektedir. Bunlar; organizma seviyesi, davranış seviyesi, ekosistem seviyesidir. Seviye doğanın hangi yönünün taklit edildiği anlamındadır. Organizma seviyesinde bitki ya da hayvan gibi belirli bir organizmaya karşılık gelir ve organizmanın tamamı ya da bir kısmı taklit edilirken, davranış seviyesinde organizmanın davranışının bir yönü ve içinde bulunduğu çevreyle etkileşimi taklit edilir. Ekosistem seviyesinde ise tüm ekosistemin ve ona başarılı bir şekilde işlemlerini sağlayan fonksiyonlar kazandıran ana ilkelerin taklit edilmesi söz konusudur [12]. Biyomimikrinin tasarıma uygulanması sürecinde araştırmacılar, tasarımdan biyolojiye yönelik ve biyolojiden tasarıma yönelik yaklaşım olarak iki farklı yöntem ele almışlardır. i) Biyolojiden tasarıma yönelik yaklaşım: Biyolojik bir olgu, yani tanımlanan bir organizma ya da ekosistemin belirli bir özellik, davranış ya da işleyişini inceleyip elde edilen verilerle tasarım sorununu çözmeye yeni bir seçenek sunar (Şekil 1). Biyolojiden tasarıma yönelik yaklaşım, Panchuk (2006) [13] tarafından dolaylı yaklaşım, Badarnah (2012) [14] tarafından çözüm tabanlı yaklaşım olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde ortak tasarım sürecinde bulunan kişilerin tasarım probleminin ne olduğuyla ilgili bilgi sahibi olmalarından ziyade ilgili biyolojik ve ekolojik araştırma bilgisine sahip olmaları gerekmektedir. Bu yaklaşım biyolojinin bir



tasarım sorununa çözüm üretme adımlarını içerir. Biyolojik bir araştırmanın yapılmış olması ve sonuçların tasarım bağlamında kullanılabilir şekilde belirlenmiş olması gerekliliği yönünden, bu yaklaşımın tasarım açısından sınırları vardır [20]. ii) Tasarımdan biyolojiye yönelik yaklaşım: Bir ihtiyacın ya da tasarım sorununun tanımlanıp, çözüm için doğadaki organizmaların ve ekosistemlerin bu işlevi nasıl gerçekleştirdiklerine bakılarak incelenmesi yöntemidir (Şekil 2).



1. KEŞFETME  
Doğal modeller (Discover)
2. SOYUTLAMA  
Tasarım ilkeleri (Abstract)
3. BEYİN FIRTINASI  
Potansiyel uygulamalar (Brainstorm)
4. BENZEMEYE ÇALIŞMAK  
Doğanın stratejileri (Emulate)
5. DEĞERLENDİRME  
Tekrar doğanın ilkeleri (Evaluate)



1. BELİRLEME  
Fonksiyon (Identify)
2. TANIMLAMA  
Bağlam (Define)
3. YORUMLAMA  
Tasarım sorusu (Biologize)
4. KEŞFETME  
Doğal modeller (Discover)
5. SOYUTLAMA  
Tasarım ilkeleri (Abstract)
6. BENZEMEYE ÇALIŞMAK  
Doğanın stratejileri (Emulate)
7. DEĞERLENDİRME  
Tekrar doğanın ilkeleri (Evaluate)

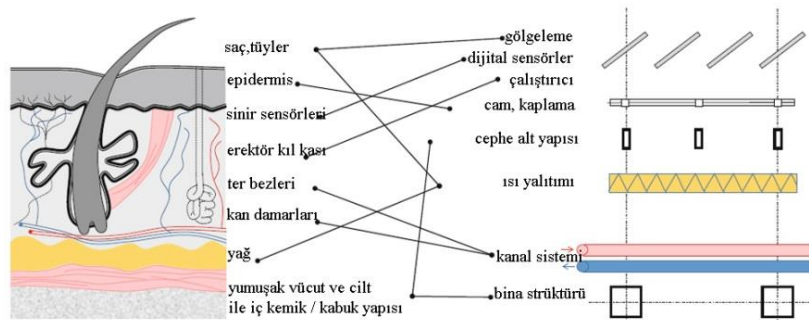
Şekil 1. Biyolojiden tasarıma yönelik tasarım (Biomimicry Guild' den aktaran [15]).

Şekil 2. Tasarımdan biyolojiye yönelik yaklaşım (Biomimicry Guild' den aktaran [15]).

Tasarımdan biyolojiye yönelik yaklaşıma, Panchuk (2006) [13]' nın dolaysız yaklaşım, Badarnah (2012) [14]' nin problem tabanlı dediği bu yöntemde tasarım problemi belirlenerek bunun doğada nasıl çözüldüğü araştırılıp tasarımda ne şekilde uygulanabileceği belirlenmektedir. Tasarımcıların sorunlarına biyomimetik bir çözüm bulmaları için derin biyoloji bilgisine sahip olmaları gerekli değildir. Bu yaklaşımda tasarımcının görevi problemi doğru bir biçimde tanımlamak ve ihtiyacın ne olduğunu saptamaktır [16]. Doğadan esinlenen bir formun ya da organizmanın mekanik özelliklerini taklit etmek tasarımcı için zor görünmeyebilir fakat kimyasal süreçler gibi bilimsel konuların taklit edilmesinde biyologların da tasarım sürecinde yer alması uygundur [13].

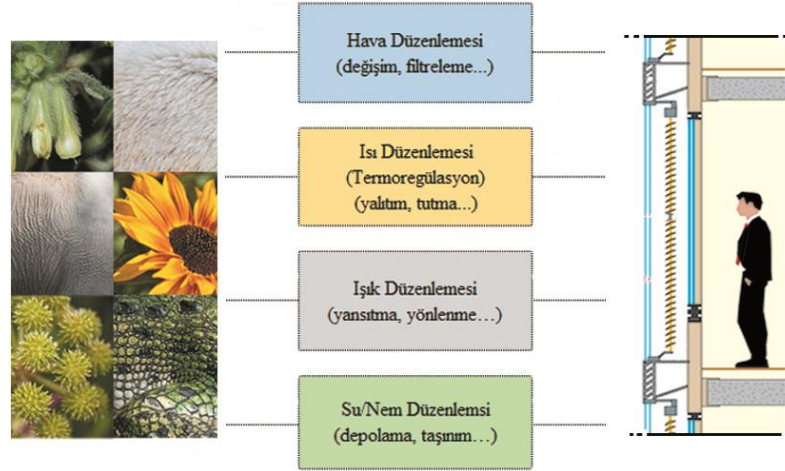
### 2.3. Enerji Etkin Cephe Tasarımı ve Biyomimikri İlişkisi (Energy Efficient Facade Design and Biomimicry Relationship)

Yapıların dış ortamla iletişim kurduğu ara yüzler farklı şekillerde adlandırılır; kabuk, zarf, zar, cilt vb. gibi. Bu kavramlar daha çok binanın her açıdan iletişim kurduğu tüm yüzeyleri ifade eder. Cephelerin mimarideki işlevi ve doğanın (deri, zarlar, kabuklar, kılıflar, kütiküller) geliştirdiği büyük koruyucu tabaka çeşitlilikleri ile benzerlik taşır. Doğal canlıların cildi, yapılarını dış koşullardan koruyan en önemli katmandır [17]. Bina cepheleri yapının dış çevre ile etkileşim halinde olan bir parçası olarak hem iç ortam koşullarını hem de bulunduğu çevreyi etkiler. Bu bakımdan doğal varlıkların yüzeyleri ile benzerlik gösterir. Bu diğer canlılarda da görülebileceği gibi hayvan derisinde de görülür (Şekil 3).



Şekil 3. Hayvan derisi ve bina cephesi arasındaki benzerlik [16]

Enerji etkin cephe tasarımları ele alındığında ise cephenin istenen konfor koşullarına bağlı olarak hava, ısı, ışık ve su/nem düzenleme ilkeleri etrafında şekillendiği görülmüştür. Doğal varlıklar da hayatta kalmak için çevrelerine uyum sağlamalı ve iç ortamlarını sabit bir durumda tutmalıdır. Bu yönde bitkiler ve hayvanlar morfolojilerini, davranışlarını ve fizyolojilerini iklimsel ve çevresel koşullara göre uyarlayabilmektedirler. Bu düzenleme sürecinde enerji ve madde alışverişi yapmak için çeşitli stratejiler geliştirmişlerdir. Bu stratejiler cephe sistemlerinde enerji etkinliği sağlamaya yönelik temel ilkeler etrafında benzerlik göstermektedir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Bina cephelerinde enerji etkinliği sağlamaya yönelik temel ilkeler [14]'den uyarlanmıştır.

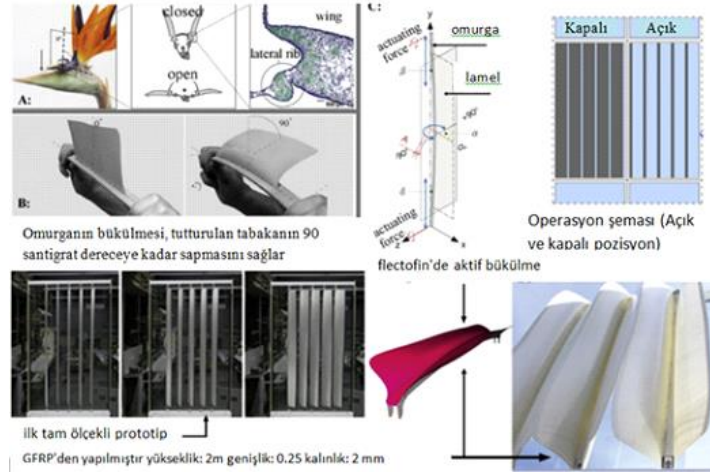
Canlı organizmaların hava, ısı, ışık, su/nem düzenleme stratejileri enerji etkin cephe tasarımları için kavramsal fikirler ve çözümler barındırmaktadır. Yapılan çıkarımları desteklemek ve öneriler getirmek amacıyla biyomimetik yaklaşım yöntemi ile doğadaki bu düzenleme ilkelerinin mimari cephelere nasıl aktarılacağı sorusu ile çalışmaya başlanmıştır. Devamında belirlenen kavramlar ve ilkelerle (mevcut enerji etkin cephe sistematığı, biyomimikri yaklaşımları ve ilkeleri vb.) oluşturulan değerlendirme tablosu ile çözüm önerileri getiren örnek projelerin enerji etkinliği analiz edilmiştir.

### 3. BİYOMİMETİK CEPHE SİSTEMLERİNİN ENERJİ ETKİNLİĞİ (ENERGY EFFICIENCY OF BIOMIMETIC FACADE SYSTEMS)

Enerji etkin cephe sistemleri ve biyomimikri arasında ilişkiyi analiz edebilmek için farklı canlılardan esinlenerek tasarlanmış, tasarım önerisi olarak geliştirilmiş, prototip olarak üretilmiş veya uygulanmış beş farklı projenin oluşturulan değerlendirme tablosu ile biyomimetik cephe sistemlerinin detaylı olarak enerji etkinlik (verimlilik, koruma, üretme vb.) analizleri yapılmıştır [18].

#### 3.1. 'Flectofin' Projesi ('Flectofin' Project)

Stuttgart Üniversitesi Bina Yapıları ve Yapısal Tasarım Enstitüsü'nde (ITKE) mimarlar, mühendisler ve biyologlar arasında disiplinler arası bir iş birliği ile 'Cennet Kuşu' çiçeğinin (*Strelitzia reginae*) tozlaşma mekanizması incelenmiştir. Omurgada bir desteğin yer değiştirmesi veya laminadaki sıcaklık değişikliğinin neden olduğu omurgadaki eğilme gerilmelerini indükleyerek kanadını 90 derece değiştirebilen menteşesiz bir panjur sistemi olan 'Flectofin' geliştirilmiştir. Menteşesiz mekanik sistemlerin kullanımı, interaktif cephe sistemleri ile yaygın olarak ilişkili bakım miktarını azaltmaktadır (Şekil 5) [19].

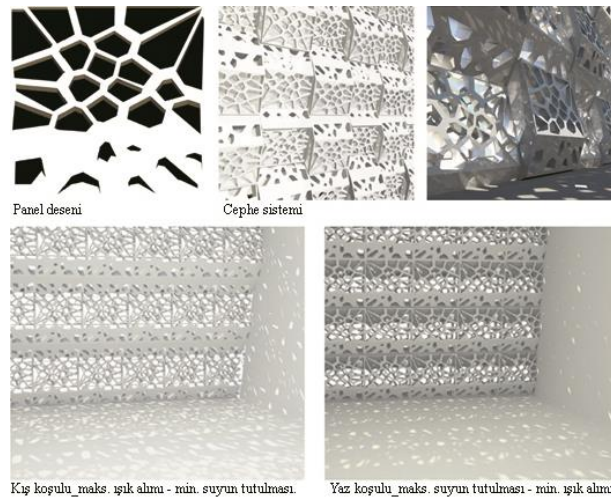


Şekil 5. Flectofin projesi [20,21]

### 3.2. Gözenekli Cilt Projesi (The Porous Skin Project)

Güney Kaliforniya Mimarlık Enstitüsünde Ilaria Mazzoleni (2011) [22] önderliğinde mimarlık öğrencileri Sarah Maansson ve Worrwolol Raksaphon tarafından geliştirilen 'Gözenekli Cilt' projesi; güneş ışığından korunma, geçirgenlik ve termal düzenleme için bir model olarak su aygırı cildini kullanarak gün ışığının alımını ve sıcaklık kontrolünü temel almaktadır. Su aygırı sudan çıktığında güneş kremi işlevi gören dermisin derinliklerindeki bezlerden bir sıvı salgılayarak kendisini güneş ışığından koruyabilmektedir. Bu koruyucu sistem, projenin bina zarfının tasarımı için ilham kaynağı olmuştur (Şekil 6).

Cildin kalınlığı, vücudun her tarafında değişmektedir, sırt üstü daha kaba, göbük ve uzuvların iç kısımlarında daha ince ve esnek hale gelmektedir. Benzer şekilde, projenin dış bina cildi olarak, derinliğine bağlı olarak güneş ışığını filtreleyen bir sistemi vardır. Daha kalın bölümler güneş perdesi gibi davranırken daha ince bölümler daha fazla ışık sağlamaktadır. Binaya gelen güneş ışığı miktarının kontrolü, sıcaklık düzenlemesinin kontrol edilmesine yönelik ilk adımdır. Su aygırının yarı-suda yaşam tarzı, binanın soğutulması için su kullanımı gibi binanın altyapı tasarımını bilgilendirebilir [2].



Şekil 6. Gözenekli Cilt (The Porous Skin) Projesi cephe sistemi [22].

### 3.3. 'Biotic-Tech' Gökdelen Şehir Projesi ('Biotic-Tech' Skyscraper City Project)

Yüksek irtifalara ulaşan binalar zorlu çevre koşullarına maruz kalır. Bu nedenle, proje zorlu doğal ortamlarda yaşayan deniz hayvanlarından (ahtapot, denizanası, kalamar, deniz süngeri) esinlenmiştir. Bu deniz hayvanlarının uyarlanabilir özellikleri (şeffaflık, esneklik, hareket, koruyucu pigmentasyon) ve doğanın kaynakları (güneş, hava akımı, su, bitki örtüsü) kullanılarak çevresel entegrasyon sağlayan binanın

şekli ve zarfının ana hatları tasarlanmıştır. Deniz süngerinin su akışını kullanan yapısından ilham alınan binada hava akışını güç kaynağı olarak kullanmak için bir rüzgâr türbini bulunmaktadır. Binanın kendisi, yüksek rüzgâr türbinlerini harekete geçiren hava akışını oluşturmak için yüksekliğini ve dolayısıyla çevre koşullarını kullanan devasa bir rüzgâr tüneli mekanizmasıdır. Bina cephesi, kullanıcılar için rahat bir ortamı desteklemek için enerji ve koruma sağlayan çeşitli katmanlara sahip entegre bir sistemdir. Birinci katman, esnekliğini kaybetmeden rüzgâr basıncı altında uzanan yarı saydam bir polimer membrandır. Bu yapısal enerjiye entegre edilen ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren çok sayıda pistonu harekete geçiren bir dalga dinamiğine neden olmaktadır. Güneş enerjisi ikinci katman tarafından kullanılmıştır. Fotovoltaik hücrelerle kaplı güneş şemsiyeleri ve farklı güneş ışığına tepki veren sensörler kullanıcılar için fonksiyonel ve rahat bir ortam yaratırken aynı zamanda binaya estetik bir görünüş sağlamaktadır (Şekil 7) [23].



*Şekil 7. Biotic-Tech Gökdelen Şehir Projesi [23]*

### 3.4. 'The BIQ House', Biyo-Akıllı Cephe Projesi ('The BIQ House', Bio-Smart Façade Project)

'BIQ' (Biyo Akıllı Cephe) evi, konutlarda biyo-reaktif cephenin uygulanması için dünyanın ilk pilot projesini temsil etmektedir. SolarLeaf adı verilen biyo-reaktif cephe, alg biyokütleri ve güneş termal ısısından yenilenebilir enerji üretmektedir. Özellikle Hamburg'daki 'BIQ' evinde, binaya ihtiyaç duyduğu tüm enerjiyi sağlayan ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarını yılda 6 ton azaltan 200 m<sup>2</sup> yosun dolgu biyo-reaktif panel bulunmaktadır. Bu pilot proje, biyokütle üretmek ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak ısınmak için mikroalg yetiştirirken, CO<sub>2</sub> emisyonlarını emen bir bina entegre sistemini örneklemektedir. Aynı zamanda, bu yenilikçi sistem dinamik gölgeleme, ısı yalıtımı ve ses azaltma gibi ek işlevleri birleştirerek bu teknolojinin tüm potansiyelini vurgulamaktadır. Bu sistem sayesinde, BIQ evi, CO<sub>2</sub> yakalamak için alg kullanımı yoluyla karbonu nötr şekilde enerji üretebilmektedir. Bundan dolayı, düşük karbonlu kentsel geleceği teşvik etmek ve daha iyi yaşam koşulları olan şehirleri biçimlendirmek ve gelecekteki bina gelişimi için iyi bir uygulamayı temsil etmektedir (Şekil 8) [24].



*Şekil 8. BIQ Apartman Binası [24]*

Sonuç olarak, 'BIQ' evi, inşaat sektöründe CO<sub>2</sub> azaltımı ve karbon tutumu için pilot bir plan ve genel olarak, gelecekteki kentsel ortamlardaki binalar için düşük karbonlu bir yaklaşım olarak önemli bir rol oynamaktadır. Enerji verimli binalar için sürdürülebilir bir enerji tasarımıyla, kendi kabuğundan enerji üretebilmekte, saklayabilmekte ve kendisi kullanabilmektedir.

### 3.5. 'CH2' Ofis Binası ('CH2' Council House)

CH2, DesignInc adlı bir mimarlık firması tarafından tasarlanan, Avustralya'daki mevcut bir ofis binasının uzantısıdır. Şekil 9' da gösterildiği gibi on katlı bir yapıdır ve 'Avustralya'daki Yeşil Bina Konseyi'nden altı yıldız alan ilk binadır [25]. Yapıda ısıtma ve soğutma sistemi için termit höyüklerinin sıcaklığını düzenlemesinden esinlenilmiştir. Aynı konsept binada, enerji tüketen ve sera gazlarının salınımına katkıda bulunan HVAC sistemlerinin kullanımını en aza indirmek için pasif soğutma ve ısıtma uygulamak için uygulanmıştır [26].



Şekil 9. Farklı açılardan CH2 binası [27]

Biyomimikri binanın farklı pek çok yerinde kullanılmıştır. Örneğin, batı cephesinde ağacın epidermis yapısından esinlenilmiştir. Burada ilham alınan cephenin dış iklimi nasıl denetleyeceğidir. Kuzey ve güney cepheleri ağacın bronşlarından esinlenilmiş ve bunlar rüzgâr boruları olarak uygulanarak CH2'nin dış kısmındaki hava kanallarına izin verilmiştir [28]. Havalandırma bacaları stratejik olarak kuzey cepheye yerleştirilmesinin amacı Avustralya'nın konumu nedeniyle güneşe en çok maruz kalan cephesi olmasıdır. Hava, kuzey deliklerine ne kadar ılık gelirse o kadar kolay çıkmaktadır ve güney hava deliklerinden gelen soğuk hava ile değiştirilmektedir. Bu süreci daha da arttırmak için kuzey cephesindeki havalandırmalar daha fazla ısıyı emmek için siyaha, güney cephesindeki havalandırmalar ısıyı yansıtacak şekilde açık renkle boyanmıştır [26]. Servis çekirdeği ve tuvaletlerden oluşan doğu çekirdek ve cephe, ağaç kabuğunu taklit etmiştir. Cilt, arkasındaki havalandırmalı ıslak alandaki ışığı ve havayı filtreleyen koruyucu bir tabaka görevi görmüştür [28].

## 4. DEĞERLENDİRME VE BULGULAR (EVALUATION AND FINDINGS)

Doğanın stratejilerinin enerji etkin cephe tasarımına etkisi ele alınan projelerde; Organizma türü, Uygulanan organizmanın etki etme seviyesi, Projenin tasarım aşaması, İklim bölgesi ve Biyomimetik seviye ve yaklaşımlarına göre karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir (Tablo 1). Değerlendirmelere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;




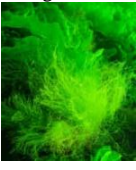

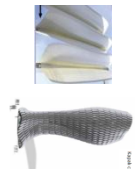




- Değerlendirilen projelerden hem hayvan hem de bitkilerin hava, ısı, ışık, su düzenleme stratejilerinin enerji etkin cephe sistemlerine aktarıldığı görülmüştür.
- Mevcut durumu fikir aşaması ve formüle edilmiş tasarım önerisi halinde olan projelerden beklenen sonuçlar incelendiğinde cephe sistemlerine aktarılabilmesi için farklı teknolojik yeniliklerin üretilmesi gerektiği görülmüştür. Prototip olarak üretilmiş, mevcut bina/sistem ve laboratuvarında test edilmiş örneklerde ise canlılığın çözümünün sisteme aktarılabildiğini ve enerji etkinliğin sağlandığı tespit edilmiştir.

- Biyomimikri seviyesi olarak, canlıların daha çok organizma ve davranış seviyesinde geliştirdiği stratejiler sisteme aktarılmıştır. Biyomimikri yaklaşımı olarak ise biyolojiden tasarıma yönelik yaklaşımda tasarımcıların daha çok canlının bulunduğu iklim, çevre koşulları altında yaşanan zorluklara karşı geliştirmiş olduğu çözümlerin kullanıldığı belirlenmiştir. Tasarımdan biyolojiye yönelik yaklaşımda ise bina cephelerinde enerji etkin, uyarlanabilir, sürdürülebilir, enerji verimli yenilikçi sistemler üretebilmek için belirlenen tasarım problemine (doğal havalandırma, ısı düzenleme, havanın filtrelenmesi, nem değişimlerine tepki vb.) yönelik biyolojik organizmanın geliştirdiği strateji soyutlanarak cephe sistemlerine aktarıldığı gözlemlenmiştir.

Projelerde canlıların geliştirdiği stratejiler var olan enerji etkin sistemlerde (çift kabuk cephe, giydirme cephe şeklinde) sistemin farklı seviyelerine (element, malzeme, bileşen vb.) aktarılmasıyla sağlanırken, strateji için özel olarak geliştirilmiş yenilikçi cephe sistemleri tasarlanarak aktarım yapılmıştır. Bunun dışında var olan cephe sistemlerine eklenebilen ikincil bir sistem olarak da aktarım yapılmıştır. Cephe sisteminin kendi içinde enerji etkinliği sağlamak için canlıların stratejileri farklı seviyelerde sisteme aktarılmıştır. Bunlar;

- Bina bölümü seviyesinde; cephe sisteminin kendisi ve perde duvar tasarımıyla aktarılmıştır.
- Bileşen seviyesinde; dış cephe parça birimi, rüzgâr türbinleri, dış cephe aktif bileşen, stoma tuğlalarından oluşan dış cephe parça birimi şeklinde tasarlanarak aktarılmıştır.
- Alt bileşen seviyesinde; gölgeleme elemanı, cephe panelleri, güneş şemsiyesi, bioreaktör panel, kontrollü pencere açıklıkları ve havalandırma kanalları, alüminyum gölgeleme cihazları, pencereler tasarlanarak aktarılmıştır.
- Element seviyesinde; gün ışığına tepki veren sensörler, cephe panelleri, fotovoltaik paneller, iklim duyarlı yenilikçi kaplama tasarımıyla sisteme aktarılmıştır.
- Malzeme seviyesinde; yenilikçi elastik malzeme, tasarım için özel olarak üretilmiş yapay kas olarak adlandırılan malzeme ve başka bir sistemde stoma tuğlası adı verilen malzeme ile tasarıma aktarılmıştır.

Tablo 1. Biyomimetik cephe sistemlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

	1	2	3	4	5
<b>Canlı</b>	Cennet kuşu çiçeği 	Su aygırı 	Mürekkep balığı ve deniz canlıları 	Algler 	Termit ve ağaçlar 
<b>Proje</b>	Flectofin 	The Porou Skin 	Biotic Tech 	BIQ Binası 	CH2 
<b>Sistemin Mevcut durumu</b>	Mevcut sistem	Formüle edilmiş tasarım önerisi	Formüle edilmiş tasarım önerisi	Mevcut bina	Mevcut bina
<b>İklim</b>		Kurak ve yarı göl iklimi			Okyanus iklimi
<b>Biyomimetik Seviye ve Yaklaşımı</b>	Davranış Seviyesi Biyolojiden tasarıma yaklaşım	Organizma ve davranış Seviyesi Biyolojiden tasarıma yaklaşım	Organizma ve davranış Seviyesi Tasarımdan biyolojye yaklaşım	Organizma ve davranış Seviyesi Tasarımdan biyolojye yaklaşım	Organizma ve davranış Seviyesi Tasarımdan biyolojye yaklaşım
<b>Eskilenilen Doğal Varlığın Enerji Etkin Stratejisi ve Sistemdeki Çözümü</b>	Canlıın uyarama bağlı hareket sistemi yapıya ışık kontrolü ve dinamik gölgelendirme sağlama şeklinde aktarılır.	Canlıın farklı deri kalınlıklarının ısı ve ışık düzenleme, gün ışığından korunmayı sağlayan yapıya, yarı suda yaşam tarzı yapıya, pasif ısıtma/sogutma, ısı yalıtımı, doğal aydınlatma, su depolama, ışık kontrolü ve dinamik gölgelendirme sağlanması yönünde aktarılır.	Deniz hayvanlarının şeffaflık, esneklik, hareket, konuyu pigmentasyon özellikleri yapıya, doğal havalandırma ve aydınlatma, sıcaklık değişimine tepki, ışık kontrolü ve dinamik gölgelendirme şeklinde aktarılır.	Alglerin CO <sub>2</sub> emme, ışığın biyokütleyle dönüştürme yapıya, Hava filtreleme, ısı yalıtımı, depolanması ve kazancı, doğal aydınlatma ve dinamik gölgelendirme sağlama şeklinde aktarılır.	Ağaç epidermisinin havalandırma mekanizması kabuklarının ışık geçirgenliği, termit höyüklerindeki delikler gözenekli dış yüzü ile ısıyı düzenleme, Yapıya doğal havalandırma ve aydınlatma, pasif ısıtma/sogutma, hava filtreleme, su depolama ve hasadı, ışık kontrolü sağlanması şeklinde aktarılır.
<b>Uygulanan Cephe Sistemi ve Sistemin Seviyesi</b>	Sistem türü hakkında veri bulunamamıştır Sistemde alt bileşen (gölgelendirme elemanı) seviyesinde	Sistemde bina bölümü (Cephe Sistemi, türü hakkında bilgi yoktur). alt bileşen (Cephe panelleri) seviyesinde	Çift katlı Cephe Sisteminde bina bölümü (cephe sistemi), bileşen (rüzgar türbinleri), alt katmanla güneş enerjisinden elemeni (gün ışığına tepki veren sensörler) seviyesinde	Cepheye ek ikinci bir sistem olarak entegre edilebilir. Sistemde binabölümü (cephe sistemi) alt bileşen (bio-reaktör panel) seviyesinde	Çift katlı cephe sistemi, Sistemde bina bölümü (Cephe Sistemi), alt bileşen (kontrolü pencere açıklıkları, havalandırma kanalları), element (cephe panelleri) seviyesinde
<b>Enerji Etkinlik Değerlendirmesi</b>	Sistem ışık kontrolünü sağlarken Herhangi bir mekanizmaya ihtiyaç duymadığı için enerji tasarrufu ve esnek tasarıma imkan verir.	Canlıdan soyutlanarak aktarılan özellikler minimum enerji tüketimi ile yaz ve kış koşullarında cephe panellerinin hareketini sağlaması için depolanan sudan faydalanılır.	Cephe için esnek ilk katmanı rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. İkinci katmanla güneş enerjisinden yararlanılır. Enerji üretimi, kazancını ve korunumu vardır.	Enerji amaçlı yüksek kaliteli biyokütle üretmekle birlikte kendi kabuğundan enerji üretir ve depolar, yenilenebilir enerji kaynakları kullanır.	Hava %100 filtrelenmiştir. Doğal aydınlatma ve havalandırma ile %65 enerji tasarrufu sağlanmıştır (A.N. Radwan, Osama, 2016). Hasad edilen ve depolanan su da soğutma sisteminde kullanılarak enerji tasarrufu sağlanır.
<b>Cephe Enerji Etkinliği Sağlamaya Yönelik Temel İhtekler</b>	Hava Isı Işık Su	Hava Isı Işık Su	Hava Isı Işık Su	Hava Isı Işık Su	Hava Isı Işık Su
	●	●	●	●	●
	●	●	●	●	●
	●	●	●	●	●
	●	●	●	●	●

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Biyomimikrinin cephe tasarımında enerji etkin çözümlere katkısını hava, ısı, ışık, su/nem düzenleme ilkeleri üzerinden ele alarak incelendiği çalışmada, biyomimetik yapı cephelerinde enerji etkinliği; a) Enerji tüketiminin azaltılması ve verimli kullanımı, b) Sistemin çalışması için hiç enerji gerekmemesi, c) Esnek tasarıma izin verme, d) Enerji kazanımı, korunumu, üretimi, e) Su depolama ve yeniden kullanımı, f) Sera gazı emisyonlarında azalma sağlama, g) Hava kirliliğini önleme, h) Yağmur suyu depolama, ı) Alan ve malzeme tasarrufu ile sağlandığı görülmüştür. Yapılan analizler sonucu elde edilen verilere dayanarak, 'Enerji etkin cephe sistemleri tasarımında doğa esinli tasarım yaklaşımı olan biyomimikri optimum düzeyde çözüm sağlayabilir.', hipotezi doğrulanmıştır. Temeli doğa olan biyomimikri, mimarlara enerji etkin cephe sistemi tasarlamalarında, sistemler için sürdürülebilir yenilikçi fikirler üretmesinde, günümüzde ve gelecekte ortaya çıkabilecek enerji sorunlarına karşı etkin çözümler üretilmesi noktasında çok önemli sistematik bir yaklaşım sunar.

Çalışma kapsamında sınırlı sayıda incelenen proje ile organizmaların stratejilerinin enerji problemlerini çözmek için yol gösterici olduğu görülmektedir. Burada önemli olan bu stratejilerin analizlerinin yapıp soyutlanarak en iyi verimi alacak şekilde sisteme aktarımının sağlanmasıdır. Araştırmada görüldüğü üzere aktarım cephe sisteminin farklı seviyelerinde (element, malzeme, bileşen vb.) yapılabilmektedir. Sonuç olarak biyomimetik cephe sistemlerinde hava, ısı, ışık, su düzenlemelerinden bir veya birkaçına çözümler üretilerek enerji etkinlik sağlanmıştır (Tablo 2). Bunlar arasından en çok ısı ve ışık düzenlemesiyle cephe sistemlerinde enerji etkinliği sağlandığı görülmüştür.

**Tablo 2.** *Biyomimetik cephe sistemlerinin enerji etkinlik değerlendirmesi*

	Canlıdan Aktarılan Özellik	Hava	Isı	Işık	Su	Enerji Etkinlik Değerlendirmesi	Enerji etkin midir ?
1	Cennet kuşu çiçeğinin uyarana bağlı hareket sistemi			Işık kontrolü Dinamik gölgelendirme		Herhangi bir mekanizmaya ihtiyaç duymadığı için enerji tasarrufu sağlanır. Esnek tasarıma imkân verir.	✓
2	Su aygırının farklı deri kalınlıkları, ışıktan korunmayı sağlayan salgılayan, Yarı suda yaşam tarzı		Pasif ısıtma/soğutma Isı yalıtımı	Doğal aydınlatma Işık kontrolü Dinamik gölgelendirme	Su depolama (Cephede kullanılan panellerin hareketi için kullanılır)	Minimum enerji tüketimi vardır.	✓
3	Deniz ayıvanlarının şeffaflık, esneklik, hareket, koruyucu pigmentasyon özellikleri	Doğal havalandırma	Sıcaklık değişimine tepki	Doğal aydınlatma Işık kontrolü Dinamik gölgelendirme		Rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş enerjisinden yararlanılır. Enerji üretimi, kazanımı ve korunumu vardır.	✓
4	Alglerin CO2 emme, ışığın biyokütleyle dönüşümü	Hava filtreleme	Isı yalıtımı Isı depolanması Isı kazancı	Doğal aydınlatma Dinamik gölgelendirme		Kendi kabuğundan enerji üretir ve depolar, yenilenebilir enerji kaynakları kullanır.	✓
5	Ağaç epidermisinin havalandırma mekanizması, kabuklarının ışık geçirgenliği, Termit höyüklerindeki delikler, gözenekli dış yüzey	Doğal havalandırma Hava filtreleme	Pasif ısıtma/soğutma	Doğal aydınlatma Işık kontrolü	Su depolama Su hasadı	Hava %100 filtrelenmiştir, Doğal aydınlatma ve havalandırma ile %65 enerji tasarrufu, hasad edilen ve depolanan su da soğutma sisteminde kullanılarak enerji tasarrufu sağlanır.	✓

Cephelerde enerji etkinlik, tek bileşenle veya sistem halinde uygulanarak sağlanabilir. Dikkate alınması gereken binaların tasarımları için enerji tüketiminin azaltılarak, iç mekân konforunun sağlanması ve çevresel etkilerin de minimum seviyelerde tutulmasıdır. Bu noktada cephe sistemlerinin, yapı sistemleri ve



çevre ile koordinasyon içinde çalışarak enerji tüketimini azaltacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Doğal sistemler burada yol gösterici olmakla birlikte tasarımlara aktarımlar disiplinler arası iş birliği ile sağlanabilir. Bu nedenle mimari tasarımcı, inşaat mühendisliği, biyoloji, fizik, kimya, klimatoloji, fizyoloji, psikoloji, nanoteknoloji ekoloji, bilgisayar mühendisliği, sibernetik ve yapay zekâ vb. gibi disiplinlerle iletişim halinde olmalıdır. Böylece biyolojik modeller akılcı bir şekilde soyutlanarak tasarımlara aktarıldığında enerji tüketiminin azaltılmasının ötesine geçerek kendi enerjisini üretebilir hale gelip, CO<sub>2</sub> salınımı yapmayan çok işlevli olacak şekilde sistemler üretilebilir. Bunun için enerji etkin cephe sistemleri tasarlanırken biyolojik çözümler iyi tanımlanmalı ve cephe tasarımlarının oluşturulmasında yaşanan problemler göz önüne alınarak anlaşılıp tasarım sürecine entegre edilmelidir. Bu çalışmada enerji etkinliğinin analizi, çalışmada belirlenen ilkeler çerçevesinde biyomimetik projelerden elde edilen veriler üzerinden nitel bir şekilde değerlendirilerek yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda daha güvenilir ve net veriler elde edebilmek amacıyla biyomimetik proje analizlerinin, enerji simülasyon programlar ve enerji performansı hesaplama yöntemleri ile yapılması önerilmektedir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karamanlioğlu, Ş., (2011), Enerji Etkin Bina Cephe Sitemlerine Yönelik Yaklaşımların İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [2] Özkılıç Keles, C., (2008), Türkiye’de Binalarda Enerji Verimliliği Açısından Fotovoltaik Sistemlerin Kullanılmasına Yönelik Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Xing, Y., Jones, P., & Donnison, I., (2017), Characterisation of nature-based solutions for the built environment. *Sustainability*, 9(1), 149.
- [4] Arslan S., Gönenç Sorguç A., (2007), "Mimari Tasarım Paradigmasında Biomimesis'in Etkisi", Gazi Mimarlık Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22(2):451-460.
- [5] Diamanti MV, Yu CP, Lee HK, editors., (2015), *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Cham: Springer International Publishing; 115-134.
- [6] Loonen RCGM, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM., (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25:483-493.
- [7] Benyus, J., (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins Publishers Inc
- [8] Beyaztaş, H.S., (2012), *Mimari tasarımda ekolojik bağlamda biçim ve doğa ilişkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [9] Selçuk, S., ve Sorguç, A., (2004), "Similarities in Structures in Nature and Man-Made Structures: Biomimesis in Architecture", 2nd International Design and Nature Conference Comparing Design in Nature with Science and Engineering, Rodos, 45-54, 28-30.
- [10] Pawlyn, M., (2016), *Biomimicry in architecture*, 2nd edition, RIBA Publishing.
- [11] Zari, M. P., (2018), *Regenerative urban design and ecosystem biomimicry*. Routledge.
- [12] Zari, M. P., (2007), *Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability*, Transforming Our Built Environment: New Zealand Sustainable Building Conference, Auckland, 14-16.
- [13] Panchuk, N., (2006), *An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design*. Master of Architecture Thesis, University of Waterloo.
- [14] Badarnah, K., L., (2012), *Towards the Living Envelope Biomimetics for building envelope adaptation*, Bachelor of Architecture Theses, Delft University of Technology, Netherlands.

- [15] Peters, T., (2011), Nature as measure: The biomimicry guild. *Architectural Design*, 81(6), 44-47.
- [16] Aldemir, B.C., (2014). Bina Kabuğunun Biçimlenmesinde Doğal Süreçlere Dayalı Üretken Yaklaşımlar, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 6-15.
- [17] Sandak, A. M., Sandak, J. M., Brzezicki, M., & Kutnar, A., (2019), Bio-based building skin. *Univerza na Primorskem, Fakulteta za matematiko, naravoslovje in informacijske tehnologije*.
- [18] Gündoğdu E., (2020), Cephe Sistemlerinin Enerji Etkinliği Üzerine Biyomimetik Bir Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [19] Web İletisi 1: <https://asknature.org/idea/flectofin-hingeless-louver-system/>
- [20] Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., (2016), Imperadori, M., Masera, G., Shape morphing solar shadings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 863–884.
- [21] Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Speck, T., & Knippers, J., (2014), A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. *Computer-Aided Design*, 60, 1–12.
- [22] Mazzoleni, I., Maya, A., Bang, A., Molina, R., Barron, F., Pei Li, Y., (2011), Biomimetic Envelopes: Investigating Nature to Design Buildings, *Proceedings of the First Annual Biomimicry in Higher Education Webinar, The Biomimicry Institute Webinar Document*, 27- 32.
- [23] Web İletisi 2: <https://architizer.com/projects/biotic-tech-skyscraper-city/>
- [24] Web İletisi 3: [https://pocacito.eu/sites/default/files/BIQhouse\\_Hamburg.pdf](https://pocacito.eu/sites/default/files/BIQhouse_Hamburg.pdf)
- [25] Web İletisi 4: <http://inhabitat.com/ch2-australias-greenest-building/>
- [26] A.Mohamed, N., F. Bakr, A., E. Hasan, A., (2019), Energy Efficient Buildings in Smart Cities: Biomimicry Approach, *Real Corp 2019: Is This The Real World? Perfect Smart Cities vs. Real Emotional Cities*, Proceedings, ISBN 978-3-9504173-6-4 (CD), 978-3-9504173-7-1 (print), Karlsruhe, Germany.
- [27] Web İletisi 5: <https://www.archdaily.com/395131/ch2-melbourne-city-council-house>
- [28] A.N., Radwan, G., Osama, N., (2016), Biomimicry, An Approach, For Energy Efficient Building Skin Design, *Procedia Environmental Sciences* 34, Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 178-189.

## Investigation of Heavy-duty Vehicle Brake Disc Cooling Behavior

 İbrahim Can GÜLERYÜZ \*  Barış YILMAZ 

Ege Fren Inc., Department of Product Design and Development, 35060, Pınarbaşı/İZMİR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 01/06/2020

Revision: 24/09/2020

Accepted: 09/11/2020

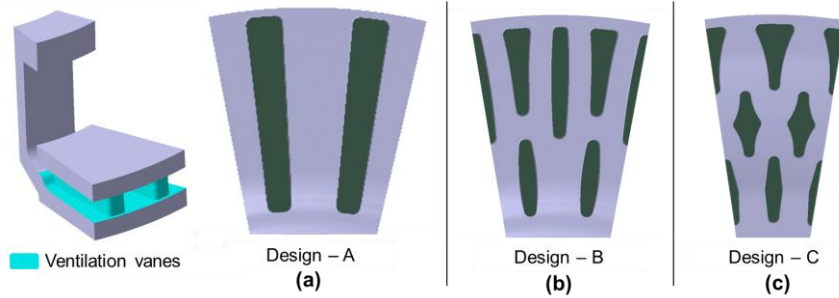
#### Highlights

- Ventilation Vane Design and Analysis of Brake Disc
- CFD and Cooldown Period Analysis

#### Keywords

 Ventilated Brake Disc  
 CFD Analysis  
 Transient Thermal  
 Analysis  
 Inertia Dynamometer  
 Heavy-duty Vehicle

In this study, computational fluid dynamics (CFD) and transient thermal analyses of heavy-duty ventilated brake discs are performed for the determination of the cooling behavior of different ventilation vane geometries. Results showed that the ventilation vane geometry has crucial influence on the average convective heat transfer coefficient and the cooldown period of the heavy-duty brake discs.



**Figure A.** Ventilation vane geometries used in the numerical investigation: (a) Straight vane (Design-A), (b) Proposed vane design (Design-B), (c) Vane design used in heavy commercial brake disc (Design-C)

**Purpose:** In this study, a validated simulation procedure is aimed for the examination of the effect of different ventilation vane geometries on the cooling performance of ventilated brake discs.

**Theory and Methods:** Firstly, the convective heat transfer coefficients are calculated for a standard (non-anticoning) ventilated brake disc by CFD analyses and they are verified by comparing with the experimental results. After ensuring the reliability of CFD analysis, the transient thermal analyses of an anticoning heavy-duty disc with straight ventilation vanes are carried out to achieve the cooldown period results. The thermal analysis parameters are verified by using the experimental cooldown period results. Furthermore, CFD and transient thermal analyses are conducted for the determination of the influence of ventilation vane geometry on the cooling performance of the brake discs.

**Results:** The results have shown that the correlation between numerical and experimental average convective heat transfer coefficients and cooldown periods is achieved by over 95 %. Furthermore, the proposed ventilation vane geometry provides the improvement in the average convective heat transfer coefficient by 18.5 % and the cooldown period by 23.5 %. The CFD and transient thermal analysis results are presented and compared in Section 4.

**Conclusion:** The simulation process used in the study showed that a considerable correlation has been achieved. Therefore, the proposed approach can be used as the main tool for the ventilation vane development projects of heavy-duty brake disc. On the other hand, those results cannot present the conditions on the vehicle due to wheel cavity and the vehicle bodywork. Therefore, further research should be conducted on vehicle level in consideration of cross-flow and vehicle package constraints. The proposed approach within scope of this study can guide for the further research to be carried out on the vehicle level.



## Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi

İbrahim Can GÜLERYÜZ \* Barış YILMAZ

Ege Fren San. ve Tic. A.Ş., Ürün Tasarımı ve Geliştirme Bölümü, 35060, Pınarbaşı/İZMİR

### Öz

Bu çalışmada, ağır hizmet araçlarında kullanılan havalandırmalı fren disklerinin farklı havalandırma kanatçığı geometrileri için soğuma davranışı incelenmiştir. İlk aşamada, deneysel taşınım katsayısı değerleri farklı dönüş hızları için bilinen, standart (konikleşme engelleyici olmayan) ağır hizmet aracı fren diskinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak hesaplanan ortalama taşınım katsayısı değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak HAD analizi değişkenleri doğrulanmıştır. Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki korelasyon % 99.9 olarak hesaplanmıştır. İkinci aşamada, konikleşme engelleyici düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı fren diskinin (referans) soğuma başarımı sayısal olarak incelenmiştir. Referans fren diskinin soğuma süresi değerleri, farklı araç hızları için atalet dinamometresi deneyleri ile elde edilmiştir. Referans havalandırmalı fren diskinin ortalama taşınım katsayısı, HAD analizleri ile hesaplanmıştır. Zamana bağlı disk sıcaklıklarını ve soğuma sürelerini elde etmek için taşınım ve ışıma etkileri göz önünde bulundurularak referans fren diskinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel soğuma süresi sonuçları karşılaştırılarak, termal analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Doğrulama sonucunda, sayısal ve deneysel soğuma süreleri arasında % 97.9'a varan bir korelasyon elde edilmiştir. Yeni bir havalandırma kanatçığı geometrisi önerilerek, konikleşme engelleyici fren disk geometrisine uyarlanmıştır. Yeni kanatçık geometrisine sahip diskin HAD ve termal analizleri gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans fren disk ve ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren disk ile karşılaştırılmıştır. Önerilen fren disk tasarımı ile referans havalandırmalı fren disk tasarımı karşılaştırıldığında, ortalama taşınım katsayısında % 18.5 artış ve soğuma süresinde % 23.5 iyileşme elde edilmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 01/06/2020  
Düzeltilme: 24/09/2020  
Kabul: 09/11/2020

### Anahtar Kelimeler

Havalandırmalı Fren  
Diski  
HAD Analizi  
Zamana Bağlı Termal  
Analiz  
Atalet Dinamometresi  
Ağır Hizmet Aracı

### Keywords

Ventilated Brake Disc  
CFD Analysis  
Transient Thermal  
Analysis  
Inertia Dynamometer  
Heavy-duty Vehicle

## Investigation of Heavy-duty Vehicle Brake Disc Cooling Behavior

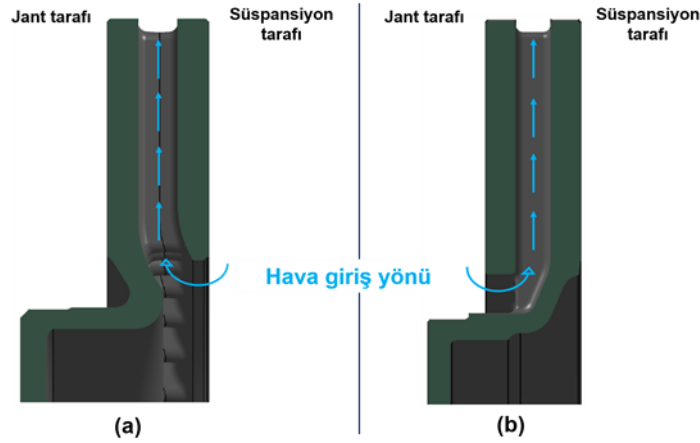
### Abstract

In this study, cooling behavior of ventilated brake disc which is used in heavy-duty vehicles was investigated for different ventilation vane geometries. In the first stage, computational fluid dynamics (CFD) analyses were conducted on a standard (non-anticoning) heavy-duty brake disc whose experimental convective heat transfer coefficients are known different rotational speeds. The CFD analysis parameters are verified by comparing the numerically calculated average convective heat transfer coefficient values with the experimental results. The correlation between numerical and experimental average convective heat transfer coefficients was calculated as 99.9 %. In the second stage, the cooling performance of anticoning heavy-duty disc (reference) with straight ventilation vanes were investigated numerically. The cooldown period values of reference brake disc were measured by inertia dynamometer experiments for different vehicle speeds. Average convective heat transfer coefficient of reference ventilated brake disc was calculated by CFD analyses. To obtain time dependent disc temperatures and cooldown periods, transient thermal analyses of reference brake disc were conducted by consideration of convection and radiation effects. The thermal analysis parameters are verified by comparing the numerical and experimental cooldown period results. As a result of the verification, a correlation between numerical and experimental cooldown periods was obtained up to 97.9 %. A new ventilation vane geometry was proposed and adopted to anticoning brake disc geometry. The CFD and thermal analyses of disc with new ventilation vane geometry were carried out and the average convective heat transfer coefficient and cooldown duration results were compared with the reference brake disc and another brake disc used in heavy commercial vehicles. In comparison of the proposed brake disc design with the reference ventilated brake disc design the average convective heat transfer coefficient was increased by 18.5 % and the cooldown period was improved by 23.5 %.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yol taşıtlarının frenlemesi sonucunda açığa çıkan yüksek ısının sistemden hızlı ve homojen bir şekilde uzaklaştırılması amacıyla disk frenli taşıtlarda havalandırma kanallı fren diskleri tercih edilmektedir. Havalandırma kanallı fren diskleri, havalandırma kanatçığı bulunmayan konvansiyonel dolu fren disklerine göre daha hafif olmalarının yanı sıra, daha fazla taşınım yüzeyine sahiptirler. Bu sayede dolu fren disklerine göre daha etkin ısı transferi karakteristiği sergilemektedirler. Havalandırma fren diskleri binek, hafif ticari ve birçok ağır hizmet aracında geniş bir uygulama alanına sahiptir [1].

Havalandırma fren disklerinde, havalandırma kanallarının açıldığı yön (hava giriş yönü) göz önünde bulundurularak iki farklı tasarım söz konusudur. Birincisinde havalandırma kanalları süspansiyon yönüne açılırken (Şekil 1(a)), diğesinde jant içerisine (Şekil 1(b)) açılmaktadır. Havalandırma kanallarının jant içerisine açıldığı tasarımlar, kanalların süspansiyon yönüne açıldığı tasarımlara göre daha rijit ve daha düşük konikleşme sergilerler [2]. Bu nedenle, bu tasarımlar konikleşme engelleyici havalandırma fren diskleri olarak isimlendirilirken; havalandırma kanallarının süspansiyon yönüne açılan tasarımlar standart (konikleşme engelleyici olmayan) havalandırma fren diskleri olarak tanımlanmaktadır.



**Şekil 1.** (a) Standart, (b) konikleşme engelleyici havalandırma fren diskleri

Frenleme sonucu açığa çıkan yüksek ısının sistemden hızlı bir şekilde uzaklaştırılmadığı ve homojen olarak dağıtılamadığı durumlarda fren diskinde çarpılma, çatlak ve hasar oluşumu ve buna bağlı ses ve titreşim problemleri, fren diski ve balatalarda erken ve düzensiz aşınma sorunları ve dingil ucundaki rulmanlarda hasar görülebilir. Bu nedenle, fren disklerinde ısı transferinin iyileştirilmesi için havalandırma kanatçıklarının optimizasyonu aktif bir araştırma alanı olmaktadır. Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğunu binek ve yüksek performans taşıtı havalandırma fren diskleri üzerine gerçekleştirilen sayısal ve deneysel çalışmalar oluşturmaktadır [1], [3]-[17]. Ayrıca literatürde hızlı trenlerde kullanılan havalandırma fren disklerinin soğuma başarımlarının incelendiği çalışmalara rastlanmaktadır [18], [19]. Ağır hizmet araçları ile ilgili yer bulan az sayıdaki çalışma [20]-[25] tarafından gerçekleştirilmiştir.

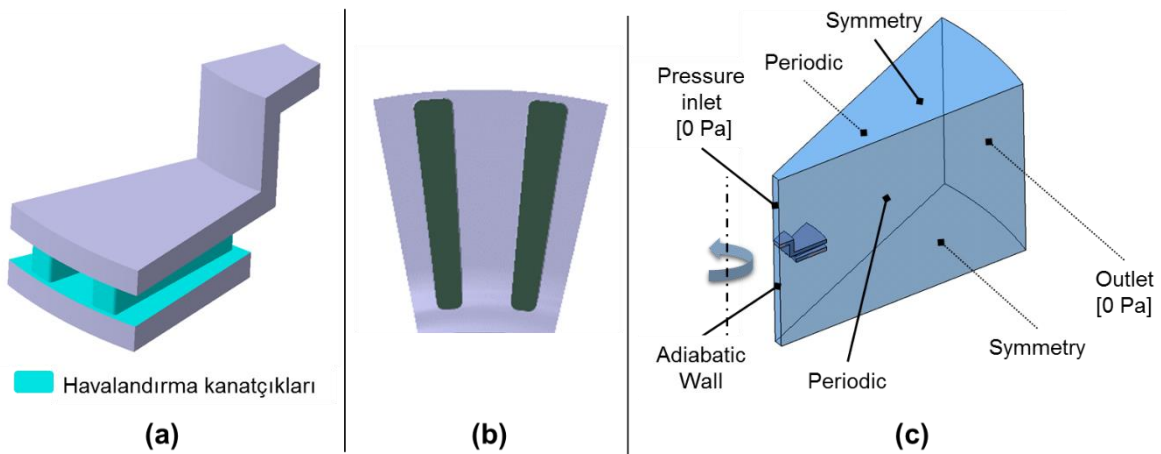
Voller ve diğ. farklı disk dönüş hızları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri ile referans aldıkları Ø434 mm dış çap ölçüsüne sahip, standart ve düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı fren diski için ortalama taşınım katsayılarını sayısal olarak hesaplamışlardır. Deneysel çalışmada, yüzey sıcaklığı 100°C'ye çıkarılmış fren diskinin sabit dönüş hızı için soğuma eğrilerini elde etmiştir. Deneysel çalışma, 100 – 800 d/dk aralığındaki dönüş hızları için tekrarlanmıştır. Soğuma eğrilerinden yola çıkılarak elde edilen deneysel taşınım katsayıları sayısal sonuçların doğrulamasında kullanılmıştır [20]. Galindo-Lopez ve Tirovic çalışmalarında, Voller ve diğ.'in deneysel çalışmasında elde ettiği ortalama taşınım katsayısı sonuçlarını kullanarak, önermiş oldukları HAD analizi değişkenlerini doğrulamıştır. Sonrasında referans alınan standart, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diskinin ardışık kanatçıklarının arasına ilave bir kanatçık yerleştirerek, bu kanatçığın havalandırma kanalındaki farklı pozisyonlarının taşınım katsayısına olan etkisi incelenmiştir [21]. Diğer çalışmalarda, durağan ortam havasında, hareketsiz haldeki havalandırma fren diskinin (havalandırma kanallarının açık ve kapalı olduğu durumlar için) doğal

taşınım analitik, sayısal ve deneysel olarak ele alınarak, ortalama taşınım katsayıları arasındaki ilişki araştırılmıştır [23], [24].

Literatürde ağır hizmet aracı fren diskleri ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların hiçbirinde atalet dinamometresi ile gerçekleştirilen sürtünme çifti devreye alma deneylerinden soğuma süresi deneyleri ile ilgili doğrulama çalışması yer almadığı gibi, farklı havalandırma kanatçıklarının fren diski soğuma süresine etkisi doğrudan araştırılmamıştır. Bu çalışmada, ağır hizmet araçlarında kullanılan 22.5" jant ölçüsüne uygun disk fren ile beraber kullanılmakta olan  $\varnothing 430$  mm dış çap ölçüsüne sahip konikleşme engelleyici havalandırma fren diskinin soğuma süresinin iyileştirilmesi için yeni bir havalandırma kanatçığı tasarımı önerilmektedir. Bu amaçla, farklı dönüş hızları için deneysel taşınım katsayısı değerleri bilinen standart, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diskinin HAD analizleri gerçekleştirilerek, HAD analizi parametreleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Atalet dinamometresi deneyleri ile farklı araç hızları için soğuma süresi değerleri bilinen konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diski referans alınmıştır. Doğrulan HAD analizi değişkenleri ile referans fren diskinin HAD analizleri gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Fren diski soğuma mekanizmasına en büyük katkı taşınım ile gerçekleşen ısı transferi ile meydana gelmektedir. Havalandırma kanatçıkları etrafındaki hava akışı ve taşınım yüzeyleri taşınım ile olan ısı transferinin iyileştirilmesinde rol oynamaktadır [20], [21]. Bu çalışmada taşınım ile olan ısı transferinin farklı fren diskleri için karşılaştırılabilmesi için birim yüzey alanında, birim sıcaklık farkında ve birim sürede gerçekleşen ısı transferinin ifadesi olan taşınım katsayısı göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, fren diski ortalama taşınım katsayısı soğuma süresinin hesaplandığı termal analizlerde disk taşınım yüzeylerine sınır koşulu olarak tanımlandığı için önemlidir. Referans fren diskinin HAD analizlerinden elde edilen ortalama taşınım katsayısı kullanılarak bu diskin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak elde edilen soğuma eğrileri ve soğuma süreleri atalet dinamometre deneyi sonuçları ile karşılaştırılarak termal analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Yeni bir kanatçık geometrisi önerilerek, bu diske ait HAD ve termal analizler tekrarlanmış, ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans fren diski ve ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diski ile karşılaştırılmıştır.

## 2. HAD MODELİNİN DOĞRULANMASI (VERIFICATION OF CFD MODEL)

Bu bölümde, HAD analizi parametrelerinin doğrulanması için literatürde farklı dönüş hızları için deneysel taşınım katsayısı değerleri bilinen standart ve düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diski referans alınmıştır [21]. Referans alınan fren diski  $\varnothing 434$  mm dış çap ölçüsüne ve 45 mm kalınlığına ve eş boşluklu 30 adet düz havalandırma kanatçığına sahiptir (Şekil 2). Literatürdeki durağan ortam havasında dönen disk problemlerinde olduğu gibi bu problemde de dönele simetri kabulü yapılmıştır [6], [9], [11], [12]. Böylece ihtiyaç duyulan hesaplama gücü ciddi oranda azaltılmıştır. HAD analizleri için oluşturulan  $24^\circ$  disk dilimi modeli Şekil 2(b)'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2. (a) Standart fren diski, (b) düz havalandırma kanatçığı, (c) HAD analizleri için hazırlanan sayısal model

Dilim disk modeli disk çapının 10 katı çapındaki ve 5 katı yüksekliğindeki kontrol hacmi ile eş merkezli olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu problemde sadece fren diskinin sabit sıcaklıktaki yüzeylerinde zorlamalı taşınım (dış akış) çözümleneceği için dilim fren diski katı modeli onu çevreleyen kontrol hacminden çıkarılarak, disk katı modeli sayısal modele dâhil edilmemiştir. Sayısal ağ yapısı yaklaşık 398.000 düğüm noktası ve 1.089.000 elemandan oluşmakta olup, sınır tabaka için ilk hücre yüksekliği 0.1 mm ve katman sayısı 10 olarak tanımlanmıştır. HAD analizleri için Ansys Fluent yazılımı kullanılmış olup, HAD analizleri için oluşturulan fren diski sayısal modeli Şekil 2(c)'de verilmiştir. Deneyler durağan ortam havasında gerçekleştirildiği için basınç girişi (pressure inlet) ve basınç çıkışı (pressure outlet) ile belirtilen sınır koşullarına 0 Pa tanımlanmıştır. Kontrol hacminde disk dönme eksenine dik üst ve alt yüzeylere simetri (symmetry), sayısal modelin dönel simetrik olduğunu belirtmek için periyodik (periodic) sınır koşulları tanımlanmıştır. Kontrol hacmi hava olup, havanın 20°C'deki termofiziksel özellikleri tanımlanmıştır. Isı transferi çözümlenmesi için enerji denklemleri etkinleştirilmiş olup, türbülans etkileri için benzer problemler için önerilen SST k-omega türbülans modeli seçilmiştir [24], [26]. Havalandırma fren diski soğuma mekanizması santrifüj fan, pompa ve türbin mantığına dayandığı için Karadeniz ve Gülyüz'ün çapraz akış türbinleri üzerine gerçekleştirdiği sayısal çalışmadaki çözücü ayarları referans alınmıştır [26]. Havaya ait kaldırma tesiri ve ışınlam etkileri ihmal edilmiştir. Galindo-Lopez ve Tirovic'in deneysel çalışmalarında ortalama taşınım katsayılarını 100°C disk yüzey sıcaklığı için 100 – 800 d/dk aralığındaki farklı dönüş hızları için hesaplamışlardır [21]. Bu nedenle HAD analizleri 200, 400 ve 800 d/dk dönüş hızları ve 100°C disk yüzey sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir.

HAD analizleri sonucunda, her bir dönüş hızı için sayısal olarak hesaplatılan ortalama taşınım katsayıları, Galindo-Lopez ve Tirovic'in deneysel çalışması sonucunda elde ettiği değerler karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmektedir [21].

**Tablo 1.** Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayılarının karşılaştırılması

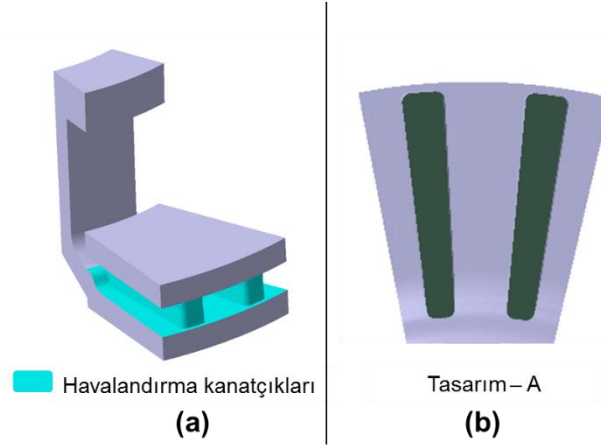
$n$ [d/dk]	$h_{conv}$ (Deney) [W/m <sup>2</sup> K]	$h_{conv}$ (Sim) [W/m <sup>2</sup> K]	Fark [%]
200	15.3	15.1	%-1.0
400	25.3	25.8	%2.2
800	45.2	45.7	%1.1

### 3. SOĞUMA SÜRESİ ANALİZLERİ VE SİSTEM İYİLEŞTİRMELERİ (COOLING TIME ANALYSES AND SYSTEM IMPROVEMENTS)

Soğuma süresi analizleri için konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı fren diski ve bu diske ait farklı araç hızları için atalet dinamometresi deneyleri ile elde edilen soğuma süresi sonuçları referans alınmıştır. Önceki bölümde doğrulanmış HAD analizi değişkenleri ile referans fren diskinin HAD analizleri gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayısı hesaplanmıştır. HAD analizlerinden elde edilen ortalama taşınım katsayısı kullanılarak referans fren diskinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak elde edilen soğuma süreleri atalet dinamometresi deney sonuçları ile karşılaştırılarak termal analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Sistem iyileştirmeleri başlığı altında yeni bir kanatçık geometrisi önerilerek, bu diskin HAD ve termal analizler tekrarlanmış, ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans fren diski ve ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diski ile karşılaştırılmak üzere hesaplanmıştır.

Termal analiz modelinin doğrulanması için referans alınan konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı fren diski Ø430 mm dış çap ölçüsüne, 45 mm kalınlığına ve eş boşluklu 30 adet düz havalandırma kanatçığına sahiptir (Şekil 3(a)-(b)). Bu tasarım "Tasarım-A" olarak isimlendirilmiştir. Disk simetrisi göz önünde bulundurularak, 24° disk dilimi modeli sayısal modele dâhil edilmiştir. Karayolları trafik yönetmeliğine göre, kamyon ve çekici grubu ağır hizmet araçları (N2 ve N3 grubu) için otoyollarda uyulması gereken yasal hız sınırı 90 km/h olarak belirtilmektedir [27]. Bu nedenle, atalet dinamometresi üzerinde gerçekleştirilen soğuma süresi deneyleri bu araçlar için belirlenen genel hizmet koşulları, bu araçların yasal hız sınırı, araç üreticileri ve ticari araçlara yönelik fren üreticisi firmaların deney prosedürleri

göz önünde bulundurularak; 30, 60 ve 90 km/h araç hızları için gerçekleştirilmektedir. Referans fren diskinin HAD analizleri doğrulanana analiz değişkenleri ile bu araç hızlarına karşılık gelen dönüş hızları ve 100°C disk yüzey sıcaklığı için önceki bölümde detayları paylaşılan sistematik izlenerek gerçekleştirilmiştir. Her bir araç hızı için sayısal olarak hesaplatılan ortalama taşınım katsayıları Tablo 4’de verilmektedir.



**Şekil 3.** (a) Konikleşme engelleyici fren diski, (b) düz havalandırma kanatçığı (Tasarım-A)

Fren diski soğuma sürelerinin sayısal olarak hesaplanması için zamana bağlı termal analizler Ansys Mechanical yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Termal analiz geometrisi olarak Şekil 3(a)’da verilen 24° disk dilimi modeli göz önünde bulundurulmuştur. Sonlu elemanlar ağı için tüm yüzeylere 3 mm eleman boyutu tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ağ yapısı yaklaşık 72.000 düğüm noktası ve 41.000 elemandan oluşmaktadır. Fren diski malzemesi olarak GG15 (EN-GJL-150) lamel grafitli dökme demir; yüksek ısı sığasına, yüksek termal iletkenliğe sahip ve düşük maliyetli olduğu için ağır hizmet araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, fren diski malzemesi olarak GG15 (EN-GJL-150) lamel grafitli dökme demir tercih edilmiştir. GG15 malzemesi için ANSYS malzeme kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

**Tablo 2.** GG15 (EN-GJL-150) malzeme özellikleri

Parametre	Değeri
Yoğunluk [ $g/cm^3$ ]	7.15
Termal iletkenlik katsayısı [ $W/(m.K)$ ]	48
Özgül ısı [ $J/(kg.K)$ ]	470

Atalet dinamometresi soğuma süresi deneyleri sırasıyla ısıtma ve soğuma fazları olarak adlandırılan ve birbirini takip eden iki aşamadan oluşmaktadır. Deneyin ilk aşamasında (ısıtma fazı), 2800 Nm’lik sabit frenleme torku 40 saniye süresince 85 km/h araç hızına karşılık gelen sabit dönüş hızı için uygulanmaktadır. Bunu takip eden soğuma fazında, frenleme torku kaldırılarak belirlenen araç hızlarına (30, 60 ve 90 km/h) karşılık gelen sabit disk dönüş hızları için fren diski sıcaklığı 50°C’ye düşüncüye kadar döndürülmekte ve soğuma eğrileri elde edilmektedir. Bu nedenle zamana bağlı termal analizler birbirini takip eden iki aşama için modellenmiştir. Ağır hizmet araçları atalet dinamometresi fren diski çatlak testi prosedüründe, 22.5” disk frenler için belirtilen sınır koşullarına göre, soğuma süresi deneylerine ait ısıtma fazı sınır koşulları (tork, süre, hız ve düşme sıcaklığı) belirlenmiştir. Bu sayede ısıtma fazı sonunda fren diski sürtünme yüzeylerindeki maksimum sıcaklığın 450 °C’nin üzerine çıkması sağlanabilmektedir.

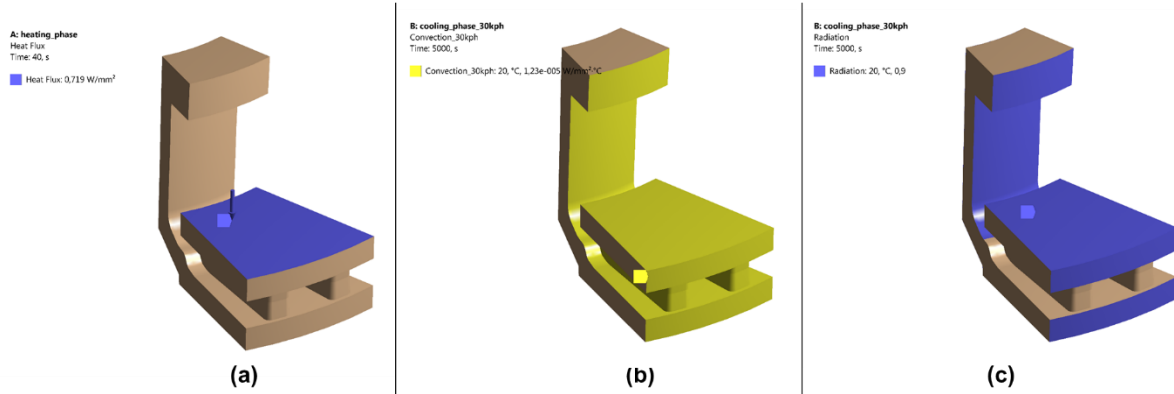
Isıtma fazında, balataların disk üzerinde süpürdüğü sürtünme yüzeylerine, 0.719 W/mm<sup>2</sup> değerindeki sabit ısı akısı 40 saniye süresince uygulanmıştır (Şekil 4(a)). Isı akısı (q), Denklem 1’de verilen frenleme torku (T<sub>b</sub>), disk dönüş hızı ( $\omega_d$ ) ve sürtünme yüzey alanı (A<sub>s</sub>) arasındaki bağıntı ile hesaplanmaktadır. Isıtma



fazında, zaman adımı 1 s için toplam analiz süresi 40 s olarak tanımlanmıştır. Frenleme torku 85 km/h araç hızına karşılık gelen sabit dönüş hızında uygulandığı için bu hızdaki ortalama taşınım katsayısı lineer interpolasyonla hesaplanarak, Şekil 4(b)'de sarı ile belirtilen taşınım yüzeylerine tanımlanmıştır. 85 km/h araç hızına karşılık gelen dönüş hızı için ortalama taşınım katsayısı 27.1 W/m<sup>2</sup>K olarak hesaplanmıştır.

$$q = \frac{T_b \cdot \omega_d}{A_s} \quad 1$$

Soğuma fazında, zaman adımı 10 s olarak tanımlanmış olup, soğuma süresi deneyleri için belirlenen araç hızlarında HAD analizleri ile Tasarım-A için hesaplanan ortalama taşınım katsayısı değerleri (Tablo 4) taşınım yüzeylerine analiz süresince sabit olarak girilmiştir. Deneyler atalet dinamometresinin çevresel modunda, dinamometre kabineye disk dönüş eksenine dik doğrultuda 2.78 m/s hızına ve 20°C sıcaklığa sahip hava verilerek gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle termal analizlerin her iki aşamasında da ortam sıcaklığı 20°C olarak tanımlanmıştır. Isıtma fazında başlangıç sıcaklığı olarak ortam sıcaklığı tanımlanırken; soğuma fazında, ısıtma fazının son zaman adımıdaki (40. s) diske ait homojen olmayan sıcaklık dağılımı başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Voller ve diğ.'in 20 – 600 °C aralığı için gerçekleştirdikleri fren diski sıcaklık ölçümleri göz önünde bulundurularak, ışıınım modellemesi için yayma oranı 0.9 olarak referans alınmıştır [20]. Her iki fazda, Şekil 4(c)'de mavi belirtilen ışıınım yüzeylerine yayma oranı olarak 0.9 ve arka plan sıcaklığı 20°C (ortam sıcaklığı) olarak tanımlanmıştır. İletim ile ısı transferi ve dinamometre çevresel modu kaynaklı çapraz akış ihmal edilmiştir. Zamana bağlı termal analizler 30, 60 ve 90 km/h araç hızları için gerçekleştirilerek, fren diski sürtünme yüzeylerindeki maksimum sıcaklığın 450°C'den 50°C'ye düşme (soğuma) süreleri hesaplanmıştır. Sayısal olarak elde edilen soğuma süreleri, atalet dinamometresi deneyleriyle elde edilen soğuma süreleri ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3'de verilmektedir.



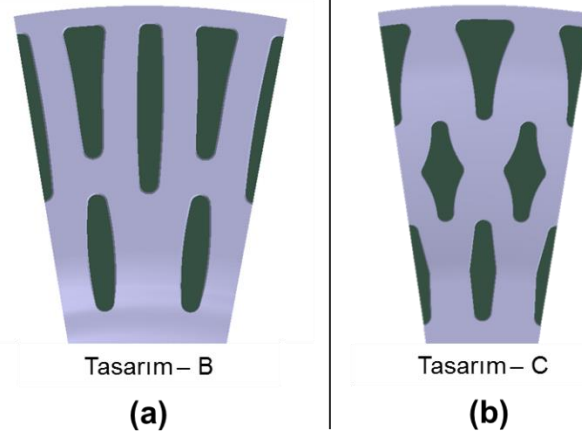
Şekil 4. Termal analiz sınır koşulları: (a) ısı akısı, (b) taşınım katsayısı, (c) ışıınım

Tablo 3. Sayısal ve deneysel soğuma sürelerinin karşılaştırılması (Tasarım-A).

V	$t_{cooling}$ (Deney)	$t_{cooling}$ (Sim)	Fark	Korelasyon
[km/h]	[s]	[s]	[%]	[%]
30	2435.5	3020	%-24.0	%96.6
60	1919.0	2090	%-8.9	%97.9
90	1531.7	1620	%-5.8	%97.8

Sistem iyileştirmesi olarak Şekil 5(a)'da verilen havalandırma kanatçığı geometrisi (Tasarım-B), referans alınan konikleşme engelleyici fren diskine uygulanarak, yukarıda detayları verilen simülasyon sistematiği izlenerek HAD ve zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yeni kanatçık profili ile

kanatçıklarının öncü ve arka kısımlarında yüksek hızlı hava akışının bir sonucu olarak, fren diski taşınım katsayısında önemli bir artış elde edilmesi hedeflenmektedir. Ortalama taşınım katsayısındaki artış ile beraber fren diski soğuma süresi testlerinde soğuma periyodu önemli miktarda azalması beklenmektedir. Yeni kanatçık profili ile elde edilen sayısal ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans konikleşme engelleyici fren diski (Tasarım-A) ve ağır ticari araçlarda kullanılmakta olan havalandırma fren diski (Tasarım-C) ile karşılaştırılmıştır [28]. Bunun için havalandırma kanatçığı geometrisi Şekil 5(b)'de verilen ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diskinin de HAD ve zamana bağlı termal analizleri doğrulanmış simülasyon değişkenleri ile gerçekleştirilmiştir.

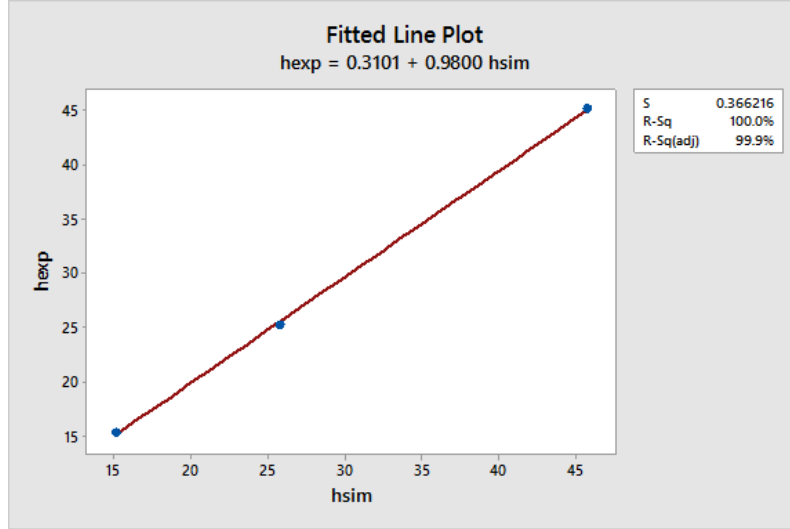


**Şekil 5.** (a) Önerilen havalandırma kanatçığı (Tasarım-B), (b) ağır ticari araçlarda kullanılan fren diskine ait havalandırma kanatçığı (Tasarım-C)

#### 4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

HAD analiz parametreleri, literatürde farklı dönüş hızları için deneysel taşınım katsayısı değerleri bilinen standart, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diski için 200, 400 ve 800 d/dk dönüş hızlarında maksimum % 2.2 fark ile doğrulanmıştır (Tablo 1). Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları ve lineer regresyon modeli kullanılarak Minitab yazılımı ile istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki korelasyon % 99.9 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Sayısal olarak hesaplanan ortalama taşınım katsayılarının gerçek duruma çok uygun sonuç verdiği açıkça görülmektedir.

Termal analiz parametreleri atalet dinamometresi deneyi sonuçları bilinen konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı referans fren diski için 30, 60 ve 90 km/h araç hızlarına karşılık gelen disk dönüş hızları için doğrulanmıştır. Sayısal ve deneysel soğuma süreleri için hesaplanan maksimum fark miktarının 30 km/h araç hızında % 24.0 olduğu görülmektedir. 60 ve 90 km/h araç hızları için hesaplanan sayısal soğuma süreleri için fark miktarının sırasıyla % 8.9 ve % 5.8 olarak elde edilmektedir. Fark elde edilmesinde rol oynayan en büyük etmen sayısal çalışmada dinamometre çevresel modu kaynaklı çapraz akışın ihmal edilmesidir. Atalet dinamometresinin çevresel modu kaynaklı çapraz akış disk dönüş eksenine dik ve disk dönüş hızından bağımsız olarak, soğuma süresi deneyleri için sabit 2.78 m/s hızındadır.



**Şekil 6.** Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki istatistiksel korelasyon

Çapraz akışın ihmal edilmesinin bir sonucu olarak tüm dönüş hızları için sayısal soğuma süreleri deneysel sürelerin üstünde kalmaktadır. Disk dönüş hızı arttıkça çapraz akışın disk soğuması üzerindeki etkinliği azalmaktadır. Bunun bir sonucu olarak düşük dönüş hızı için hesaplanan fark miktarı diğer iki hıza göre daha yüksektir. İstatistiksel olarak hesaplanan minimum korelasyon 30 km/h araç hızında % 96.6'dır. Benzer şekilde 60 ve 90 km/h araç hızları için korelasyon yüzdesi sırasıyla % 97.9 ve % 97.8 olarak hesaplanmaktadır (Tablo 3). Her üç araç hızı için de yüksek korelasyon elde edildiği söylenebilmektedir.

Sistem iyileştirmeleri başlığı altında gerçekleştirilen karşılaştırmalı HAD ve zamana bağlı termal analizler sonucunda hesaplanan ortalama taşınım katsayısı ve 450°C'den 50°C'ye soğuma süresi sonuçları 30, 60 ve 90 km/h araç hızlarına karşılık gelen disk dönüş hızlarında her üç tasarım için Tablo 4'de incelenmiştir. Önerilen havalandırma kanatçığı geometrisi (Tasarım-B) ile referans alınan tasarıma (Tasarım-A) göre ortalama taşınım katsayısında her üç hızdaki değerlerin ortalaması alınarak elde edilen artış % 18.5'dir. Taşınım katsayısındaki % 18.5 artışa karşılık olarak, sayısal soğuma süresi Tasarım-A'ya göre ortalama % 23.3 azalma görülmektedir. Tasarım-C için sayısal olarak hesaplanan ortalama taşınım katsayısı değerleri her üç hız içinde Tasarım-A'nın üzerinde yer almaktadır. Buna paralel olarak Tasarım-C'ye ait soğuma süreleri her üç hızda da Tasarım-A'nın altında yer almaktadır. Önerilen tasarım ile referans tasarıma göre; Tasarım-C'nin ortalama taşınım katsayısında elde edilen iyileşmeden 1.56 kat daha fazla artış elde edilmektedir. Buna ek olarak, 450°C'den 50°C'ye Tasarım-B'nin soğuma süresindeki iyileşme; Tasarım-C ile sağlanandan 2.1 kat daha fazladır. Havalandırma kanatçığı tasarımının fren diski soğuma karakteristiği üzerindeki önemi açıkça görülmektedir.

**Tablo 4.** Sayısal ortalama taşınım katsayıları ve soğuma sürelerinin karşılaştırılması.

V [km/h]	$h_{conv}$ [W/m <sup>2</sup> K]			$t_{cooling}$ [s]		
	Tasarım-A (Referans)	Tasarım-B (Önerilen)	Tasarım-C	Tasarım-A (Referans)	Tasarım-B (Önerilen)	Tasarım-C
30	12.3	14.6 (↑%18.8)	13.6 (↑%10.2)	3020	2360 (↓%21.9)	2870 (↓%5.0)
60	20.1	23.9 (↑%18.8)	22.8 (↑%13.4)	2090	1600 (↓%23.4)	1920 (↓%8.1)
90	28.0	33.0 (↑%17.9)	31.3 (↑%11.9)	1620	1220 (↓%24.7)	1460 (↓%9.9)
Ortalama [%]	-	↑%18.5	↑%11.8	-	↓%23.5	↓%7.6

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ağır hizmet aracı havalandırılmalı fren diskinin soğuma karakteristiğinin belirlenmesi için yapılan sayısal analizler sonucunda hesaplanan ortalama taşınım katsayısı ve 450°C'den 50°C'ye soğuma süreleri literatürde ve hali hazırdaki deney sonuçları ile doğrulanarak sayısal modellemenin önemi ortaya koyulmuştur. Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki korelasyon % 99.9 olarak hesaplanmıştır. Karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilen HAD ve zamana bağlı termal analizlerle havalandırma kanatçığı tasarımının fren diski soğuma karakteristiği üzerindeki önemi vurgulanmıştır. Farklı araç hızları için gerçekleştirilen soğuma süresi analizleri ve deneyleri arasında % 97.9'a varan korelasyon elde edilmiştir. Önerilen fren diski tasarımı (Tasarım-B) ile referans havalandırılmalı fren diskine göre, ortalama taşınım katsayısında % 18.5 artış ve soğuma süresinde % 23.5 iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca önerilen tasarımın soğuma süresindeki iyileşme; ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diski tasarımı (Tasarım-C) ile sağlandan 2.1 kat daha fazladır. Sonuçlardan da görülebileceği üzere, havalandırma kanatçığı tasarımının fren diski soğuma karakteristiği üzerindeki önemi büyüktür. Bu çalışma kapsamında, ağır hizmet aracı fren disklerinin atalet dinamometresi ile soğuma süresi deneyleri sayısal olarak incelenerek doğrulandığı için literatüre anlamlı bir katkı sağlanmıştır. Diğer bir katkı ise, farklı havalandırma kanatçıklarının fren diski soğuma süresine etkisinin araştırılmasıdır. Bu çalışmada doğrulanan sayısal modelleme sistematigi ile farklı kanatçık tasarımlarının durağan ortam havasında diskin dönüşü ile havalandırma kanatçıkları etrafındaki hava akışının soğuma karakteristiğine olan etkisi karşılaştırmalı olarak hesaplanabilmektedir. Bu sayısal sonuçlar çapraz akış ve araç gövdesinin, aks ucu ve araç altı paketlemesinin etkilerini içermemektedir. Çapraz akış, araç gövdesi ve paketleme kısıtları göz önünde bulundurularak araç seviyesinde sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Çalışma kapsamında önerilen simülasyon sistematigi araç seviyesinde gerçekleştirilecek ileri çalışmalar için yol göstericidir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Tübitak 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında "Ağır ticari araçlar için yüksek başarılı havalandırılmalı fren diski ve poyra tasarımı" başlıklı ve 3190738 numaralı projesi kapsamında desteklenmektedir. Yazarlar desteklerinden dolayı Tübitak'a ve Ege Fren San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Mew, T. (2015). Transient Thermal Response Of Solid, Pinned And Highly Porous Ventilated Brake Discs, Doktora Tezi, University of Witwatersrand, Johannesburg.
- [2] Thuresson, A. (2014). *Cfd And Design Analysis Of Brake Disc*. Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- [3] Gotowicki, P. F., Nigrelli, V., Mariotti, G. V., Aleksendric, D. and Duboka, C. Numerical And Experimental Analysis Of A Pegs-Wing Ventilated Disk Brake Rotor, With Pads And Cylinders. *In 10 th EAEC European Automotive Congress, 1-15*, (2005).
- [4] Stephens, A. (2006). *Aerodynamic Cooling Of Automotive Disc Brakes*. Yüksek Lisans Tezi, RMIT University, Melbourne.
- [5] Chi, Z. (2008). *Thermal Performance Analysis And Geometrical Optimization Of Automotive Brake Rotors*, Doktora Tezi, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa.
- [6] McPhee, A. D. and Johnson, D. A. Experimental Heat Transfer And Flow Analysis Of A Vented Brake Rotor. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(458-467), (2008).
- [7] Pulugundla, G. (2008). *Cfd Design Analysis Of Ventilated Disc Brakes*. Yüksek Lisans Tezi, Cranfield University, Cranfield.
- [8] Düzgün, M. and Yıldız, Y. Soğutma Kanallı Fren Disklerinin Frenleme Kuvvetlerine Ve Isı Değişimine Etkileri. *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 1-6, (2009).
- [9] Palmer, E., Mishra, R. and Fieldhouse, J. An Optimization Study Of A Multiple-Row Pin-Vented Brake Disc To Promote Brake Cooling Using Computational Fluid Dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(865-875), (2009).
- [10] Sarip, S. B. (2011). Lightweight Friction Brakes For A Road Vehicle With Regenerative Braking. Design Analysis And Experimental Investigation Of The Potential For Mass Reduction Of Friction Brakes On A Passenger Car With Regenerative Braking, Doktora Tezi, University of Bradford, Bradford.
- [11] Pevec, M., Potrc, I., Bombek, G. and Vranesevic, D. Prediction Of The Cooling Factors Of A Vehicle Brake Disc And Its Influence On The Results Of A Thermal Numerical Simulation. *International Journal of Automotive Technology*, 13(725-733), (2012).
- [12] Raj, K. T. R., Ramsai, R., Mathew, J. and Soniya, G. Numerical Investigation Of Fluid Flow And Heat Transfer Characteristics On The Aerodynamics Of Ventilated Disc Brake Rotor Using CFD. *Thermal Science*, 18(667-675), (2014).
- [13] Belhocine, A. and Bouchetara, M. Structural And Thermal Analysis Of Automotive Disc Brake Rotor. *Archive of Mechanical Engineering*, 61(89-113), (2014).
- [14] Belhocine, A., Cho, C. D., Nouby, M., Yi, Y. B. and Bakar, A. R. A. Thermal Analysis Of Both Ventilated And Full Disc Brake Rotors With Frictional Heat Generation. *Applied and Computational Mechanics*, 8(5-24), (2014).
- [15] Shinde, V. V., Sagar, C. D. and Baskar, P. Thermal And Structural Analysis Of Disc Brake For Different Cut Patterns. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 11(2231-5381), (2014).

- [16] Yan, H. B., Zhang, Q. C. and Lu, T. J. An X-Type Lattice Cored Ventilated Brake Disc With Enhanced Cooling Performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80(458-468), (2015).
- [17] Kiran, C. H. Numerical Stimulation Of Ventilated Disc Cooling Effect. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 4(257-270), (2015).
- [18] Jiang, L., Jiang, Y. L., Liang, Y. U., Nan, S. U. and Ding, Y. D. Thermal Analysis For Brake Disks Of Sic/6061 Al Alloy Co-Continuous Composite For CRH3 During Emergency Braking Considering Airflow Cooling. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(2783-2791), (2012).
- [19] Ghadimi, B., Kowsary, F. and Khorami, M. Thermal Analysis Of Locomotive Wheel-Mounted Brake Disc. *Applied Thermal Engineering*, 51(948-952), (2013).
- [20] Voller, G. P., Tirovic, M., Morris, R. and Gibbens, P. Analysis Of Automotive Disc Brake Cooling Characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(657-666), (2003).
- [21] Galindo-Lopez, C. H. and Tirovic, M. Understanding And Improving The Convective Cooling Of Brake Discs With Radial Vanes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222(1211-1229). (2008).
- [22] Tang, J., Bryant, D. and Qi, H. S. Coupled CFD And FE Thermal Mechanical Simulation Of Disc Brake. *Eurobrake Conference Proceedings*, (1-10), (2014).
- [23] Stevens, K. and Tirovic, M. Heat Dissipation From A Stationary Brake Disc, Part 1: Analytical Modelling And Experimental Investigations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(1707-1733), (2018).
- [24] Tirovic, M. and Stevens, K. Heat Dissipation From A Stationary Brake Disc, Part 2: CFD Modelling And Experimental Validations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(1898-1924), (2018).
- [25] Güleriyüz İ. C. and Yılmaz B. Investigation Of Flow And Thermomechanical Performance Of Ventilated Brake Discs Used In Heavy-Duty Vehicles, 2. *International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology Proceedings*, 529-536, (2019).
- [26] Karadeniz Z. H. and Güleriyüz İ. C. Çapraz Akışlı Rüzgar Türbini Başarımının İncelenmesi, 2. *İzmir Rüzgar Sempozyumu*, 87-96, (2015).
- [27] Müdürlüğü, Emniyet Genel. Karayolları trafik yönetmeliği. *Ankara: Resmi Gazete (23053 Mükerrer sayılı)* (2012).
- [28] Oberti, L. World Intellectual Property Organization Application No. WO2004/102028A1, (2004).

## Evaluation of Surface Roughness Based on Cutting Parameters in Hard Turning of DIN 1.2367 Steel with CBN Tools

Abidin ŞAHİNOĞLU<sup>1</sup>  Mehtap YAVUZ<sup>2</sup>  Mehmet AKKAŞ<sup>3,\*</sup> 

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar University, Manisa Technical Sciences Vocational School, 45140 MANİSA

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin University, Vocational School, 18000, ÇANKIRI

<sup>3</sup>Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, 37150, KASTAMONU

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 18/10/2020

Revision: 13/11/2020

Accepted: 13/11/2020

#### Highlights

- Hard turning.
- CBN tools.
- Heat treatment.

#### Keywords

DIN 1.2367

CBN

Surface Roughness

Hard Turning

In this study, the effect of cutting parameters on the surface roughness of hard turning DIN 1.2367 (55 HRC) steel material was investigated. Three different cutting speeds, feed rates and cut of depths were used in experiments conducted under dry cutting conditions. It was seen that the most effective cutting parameter in the surface roughness value was the feed rate. In addition, a mathematical model was created to estimate the surface roughness.

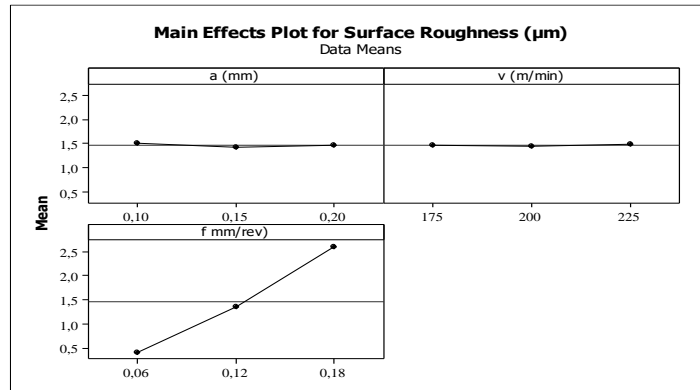


Figure A. Surface roughness main effect plots

**Purpose:** In this study; The effect of cutting parameters on the surface roughness was examined and DIN 1.2367 steel was used as the work piece material. Tool steel 1.2367 is a hot work steel with high wear resistance and heat resistance. This material is often used in large pressure die casting production.

**Theory and Methods:** In this study, to examine the hard turning process, DIN 1.2367 material was cooled suddenly in oil after being heated at 900 °C for 2 hours to reach a hardness value of 55 HRC by heat treatment. After this process, the steel material has reached a very high hardness value. But the fragility of the material has increased. Tempering has been used to reduce the brittleness of the material. In order to remove the stresses in the cooled material, it was heated at 300 °C for 1 hour and cooled in air.

**Results:** Nine additional tests were conducted to observe the effects of the coolant only. Thus, processing time and cost were limited. There appears to be no noticeable change in surface roughness due to the use of coolant. The reason for this can be shown as the temperature does not increase with the CBN tips used in the experiments. The cutting parameter that most affects the surface roughness is the feed rate. It has been determined that as the amount of advance increases, the surface roughness increases. It is known that the feed rate has a significant effect in reducing the surface roughness.

**Conclusion:** In this study, characterization study has been done for DIN 1.2367 steel material and detailed information about the mechanical properties of the material was obtained. According to the results obtained in the experimental studies; It has been observed that surface quality can be obtained by using cutting tools with suitable machine tool and optimum cutting parameters suitable for hard turning process.



## DIN 1.2367 Çeliğin CBN Takımlarla Sert Tornalanmasında Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

Abidin ŞAHİNOĞLU<sup>1</sup> Mehtap YAVUZ<sup>2</sup> Mehmet AKKAŞ<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 45140 MANİSA

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, 18000, ÇANKIRI

<sup>3</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 37150, KASTAMONU

### Öz

Talaş kaldırma işleminde kesme parametrelerinin, işlenen malzemeye göre optimum değerleri vardır. Fakat tezgâhın rijitliği, kesici takım özellikleri, soğutma sıvısı veya kuru kesme şartları da işleme koşullarını oldukça etkiler. Çok değişkeni olan bu imalat sürecinde sert tornalama için en önemli yanıt parametresi de yüzey pürüzlülüğüdür. Bu çalışmada sertleştirilmiş DIN 1.2367 (55 HRC) çelik malzemenin sert tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi incelenmiştir. Kuru kesme koşullarında yapılan deneylerde üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve üç kesme derinliği kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerinde en etkili kesme parametresinin ilerleme hızı olduğu görülmüştür. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün tahmini için matematiksel model oluşturulmuştur. Bu çalışmada ayrıca DIN 1.2367 çelik malzemesi için karakterizasyon çalışması yapılmış ve malzemenin mekanik özellikleriyle ilgili detaylı bir bilgi elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre; sert tornalama işlemine uygun takımlar kullanılarak, uygun tezgâhlarda ve optimum kesme parametreleri ile taşlama kalitesinde yüzey elde edilebileceği görülmüştür.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 18/10/2020  
 Düzeltme: 13/11/2020  
 Kabul: 13/11/2020

### Anahtar Kelimeler

DIN 1.2367  
 CBN  
 Yüzey Pürüzlülüğü  
 Sert Tornalama

### Keywords

DIN 1.2367  
 CBN  
 Surface Roughness  
 Hard Turning

### Evaluation of Surface Roughness Based on Cutting Parameters in Hard Turning of DIN 1.2367 Steel with CBN Tools

#### Abstract

In the chip removal process, cutting parameters have optimum values according to the material being processed. However, the rigidity of the machine tool, cutting tool properties, coolant or dry cutting conditions also affect the machining conditions. The most important response parameter for hard turning in this manufacturing process, which has many variables, is the surface roughness. In this study, the effect of cutting parameters on the surface roughness of hard turning DIN 1.2367 (55 HRC) steel material was investigated. Three different cutting speeds, feed rates and cut of depths were used in experiments conducted under dry cutting conditions. It was seen that the most effective cutting parameter in the surface roughness value was the feed rate. In addition, a mathematical model was created to estimate the surface roughness. In this study, characterization study has been done for DIN 1.2367 steel material and detailed information about the mechanical properties of the material was obtained. According to the results obtained in the experimental studies; It has been observed that surface quality can be obtained by using cutting tools with suitable machine tool and optimum cutting parameters suitable for hard turning process.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sert işleme, 45 ila 65 HRC aralığına sahip sertleştirilmiş çelik numunelerin işlenmesi işlemidir. Sertlik değerindeki artış, malzemenin aşınma, yorulma, sürtünme direncini artırır. 45-65 HRC aralığında malzeme mukavemeti 2-4 kat artar. Bu nedenle makinenin kullanım ömrü uzar. Sert tornalamaya alternatif yöntem ise taşlamadır [1]. Sert tornalama, bir son tornalama işlemidir. Bu nedenle yüzey kalitesinin yüksek olması beklenir ve taşlama düzeyinde bir yüzey kalitesi amaçlanır. Silindirik taşlama ile karşılaştırıldığında sert tornalama, daha az işletme maliyeti ve daha az güç ve enerji tüketimi gibi önemli faydalar sağlar ve kesme



sıvısına gerek olmadan yapılabilmesi yönüyle de çevre dostu bir işlemdir [2]. Zira endüstriler, üretim maliyetinin % 7 ila % 17'sini, sadece soğutma sıvısına harcamaktadırlar [3].

Sert tormalama uygulamasının en önemli yanı yüzey pürüzlülük değerini önemli ölçüde etkilemesidir. Talaş oluşum özellikleri de sert tormalamanın temel araştırma alanıdır. Yüzey kalitesi açısından, kesme hızı ile belirlenen bozukluklar çok kritiktir [1]. Yeni çalışmalar, iş parçası/kescici takım karakteristiklerinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli faktörler olduğunu göstermiştir [4]. Takım malzemesi genellikle dinamik yüklere duyarlı kübik bor nitrürdür (CBN). Bu nedenle, sert tormalama araştırmalarında talaş morfolojisi, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün korelasyonuna çok dikkat edilir. Yüksek takım maliyeti ve işlenebilirlik noktasındaki sınırlılıklar, sert tormalama işleminin önünde duran problemlerdir [1]. Üretim maliyetini eski seviyelerinde tutarak ve çevreyi etkilemeden ürün kalitesini artırmak, bugün için en çok odaklanan mühendislik sorunudur[5]. Durum böyle iken bu iki kriteri yerine getirmek için proses parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir. Çalışanların daha önceki deneyimlerinden veya endüstriyel kataloglardan faydalanmak bir çok amacı yerine getirir, ancak imalat sektörlerine dahil olan daha yeni malzemelerde bu deneyimler yetersiz kalır [6].

Sert tormalama işleminde yüzey pürüzlülüğünün araştırıldığı birçok çalışmadan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Das ve diğerleri, hem kriyojenik işlem uygulanmış hem de işlem uygulanmamış sermet uçlarla, sertleştirilmiş çeliğin kuru tormalanmasında, kesme kuvveti, yanak aşınması, krater aşınması, talaş morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmişlerdir. Talaş oluşum sürecinin, kriyojenik işlemde büyük ölçüde etkilendiğini ifade etmişlerdir [7]. Jena ve diğerleri, AISI 4340 çeliğinin sert tormalanmasında yüzey pürüzlülüğünün taşlama kalitesine yakın olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünü temel olarak aksel ilerleme miktarının etkilediği sonucuna varmışlardır [8]. Subbiah ve diğerleri, silici (wiper) seramik kesme ucunun performansının değerlendirdikleri çalışmada iş parçası sertliğinin yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım aşınması üzerinde önemli istatistiksel etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. İlerleme miktarının, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen ana kesme parametresi olduğu da çalışmanın sonuçları arasındadır [9]. Elkaseer ve diğerleri, 316L paslanmaz çelik numuneleri ile gerçekleştirmiş oldukları tormalama operasyonunda, geleneksel tormalama işlemlerinin aksine, ilerleme miktarı ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulunduğunu ifade etmişlerdir [10]. Umamaheswarrao ve diğerleri, kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, burun yarıçapı ve negatif eğim açısının yüzey pürüzlülüğü ve iş parçası yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada, ilerleme miktarının, yanıtı kontrol etmede en önemli parametre olduğu ve bunu kesme derinliği, negatif eğim açısı, burun yarıçapı ve kesme hızının izlediği sonucuna varmışlardır [11]. Thangarasu ve diğerleri, kesici takım yanak aşınmasını, yapay sinir ağı kullanılarak, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü tepkilerine dayanarak tahmin etmişlerdir. Deney malzemesi 255 BHN sertliğe sahip EN8 çeliğidir. Çalışmanın sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme miktarı ve kesme derinliği etkileşiminden büyük ölçüde etkilendiği vurgulanmıştır [12]. Vladimirov ve diğerleri, regresyon analizi temelinde, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki titreşimli tormalama titreşim parametrelerinin etkisini belirleyen matematiksel bir model geliştirmişlerdir [13]. Chandra ve diğerleri, AISI D2 çeliğini, kuru, soğutma sıvısı ve alümina bazlı nanoparçacıklı MQL ortamında tormalamış ve MQL kesme ortamının, kuru ve ıslak kesme ortamlarından daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir [14]. Panda ve diğerleri, AISI 4340 çeliğin (49HRC) kaplamalı seramik takımla kuru sert tormalanmasında yüzey pürüzlülüğünü modellemişlerdir. Aksel ilerleme hızı ve kesme hızının sert tormalama işlemi için en önemli kontrollü kesme parametreleri olduğunu söylemişlerdir [15]. Das ve diğerleri, yaptıkları deneysel çalışmada yaptıkları istatistiksel analizler sonucunda, kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğünü ve ardından ilerleme hızını ve kesme hızını etkileyen baskın işleme parametresi olduğunu ileri sürmüşlerdir [2]. Ambhore ve diğerleri, Sertleştirilmiş AISI52100 çeliğini tormalanmasında, kesme koşullarının titreşim sinyalleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Yüzey pürüzlülüğü ilerleme miktarı ve ardından kesme hızından büyük ölçüde etkilenirken, kesme derinliğinden daha az etkilenmiştir [16]. Mir ve diğerleri, AISI D2 çeliğinin sert tormalanması sırasında kaplanmış CBN kesici takımın, takım aşınması ve yüzey kalitesi açısından kaplamalı karbür takımlara kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [17]. Şahinoğlu ve Rafighi, üç farklı sertleştirilmiş AISI 1040 çelik (10, 15, 20 HRC) üzerinde gerçekleştirdikleri tormalama testleri sonucunda, ilerleme hızı değerindeki bir artışın yüzey pürüzlülüğü, ses seviyesi ve güç tüketimi değerlerinde bir artışa neden olduğunu işaret ederken ilerleme

hızının yüzey pürüzlülüğünü ve güç tüketimini etkileyen en etkili işleme parametresi olduğunu bildirmişlerdir [18].

Bu çalışmada ise; kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi incelenmiş ve iş parçası malzemesi olarak da DIN 1.2367 çeliği kullanılmıştır. Takım çeliği 1.2367, yüksek aşınma direncine ve ısı direncine sahip bir sıcak iş çeliğidir. Bu malzeme genellikle büyük basınçlı döküm üretiminde kullanılır. Deneylerde üç farklı kesme derinliği (0,10-0,15-0,20 mm) kesme derinliği, üç farklı kesme hızı (175, 200, 225 m/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0,06-0,12-0,18 mm/dev) kullanılmıştır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, sert tornalama işlemini incelemek için DIN 1.2367 malzeme, ısıtma işlemi ile 55 HRC sertlik değerine ulaşması için 900 derecede 2 saat ısıtıldıktan sonra, ani bir şekilde yağda soğutulmuştur. Bu işlemden sonra çelik malzeme çok yüksek sertlik değerine ulaşmıştır. Fakat malzemenin kırılabilirliği artmıştır. Malzemenin kırılabilirliğini azaltmak için temperleme işlemi yapılmıştır. Soğutulan malzemedeki gerginliklerin giderilmesi için 300 derecede 1 saat ısıtılarak, havada soğutulması işlemi gerçekleştirilmiştir. Malzemenin homojen sertleşip sertleşmediğinin anlaşılması için malzeme yüzeyinden 1 mm talaş kaldırılmıştır. Böylelikle yüzeydeki sert tabaka kaldırılmış ve malzemenin heterojen yapısından kaynaklanacak hatalar en aza indirilmiştir. Yüzeydeki Daha sonra farklı noktalarda sertlik değeri ölçülmüştür  $\pm 1$  HRC'lik sertlik değeri elde edilmiştir.

İş parçasının boyu çapından 3 kat fazla olduğu ve olabilecek titreşimlerin engellenmesi için iş parçası malzemesi ayna ve punta arasına bağlanmıştır. Böylece parçanın rijit ve salgısız dönmesi sağlanmıştır. Son tornalama işlemlerinde talaş derinliklerinin düşük olması muhtemel salgıların en aza indirilmesini gerekli kılmaktadır. Malzemelerin sert olması, düşük talaş derinliklerinde dahi yüksek kuvvetlerin oluşmasına neden olduğundan, iş parçası bağlanırken ayna ve punta hidrolik basınçlarının 40 bara yakın olmasına dikkat edilmiştir. İş parçasındaki salgı komparatör saati ile kontrol edildikten sonra, yüzeyde 0,2 mm talaş kaldırılarak oluşabilecek salgı en aza indirilmiştir.

İş parçası yüzeyinde 2 mm genişliğinde kanallar açılarak her bir deneysel çalışmanın diğerlerinden ayrılması sağlanmıştır. Kesme parametreleri belirlenirken, öncelikle takım katalog değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Bir son tornalama işlemi olduğu ve yüzey kalitesinin yüksek olması için kesme parametreleri literatür çalışmaları göz önünde bulundurulurken belirlenmiştir. Kesme parametrelerinin aralarındaki oranın bir birine yakın olmasına dikkat edilmiştir. İlerleme miktarı, kesme hızı, talaş derinliği aralıklarının olabildiğince geniş bir aralıkta seçildikten sonra ön deneyler yapılarak takım tezgahı, kesici takım ve iş parçası üçlüsünün uyumlu olup olmadığı test edilmiştir.

Kesici takım olarak sert tornalama işlemine uygun Sandvik Coromant firmasına ait DCGW11T304 geometrisine sahip CBN takım ve bu takıma uygun 95 yavaşma ve boşluk açısına sahip kater kullanılmıştır. Takımların ve katerin olabildiğince rijit olması için önerilen değerlerde sıkılmış ve kater mesafesi olabildiğince kısa bağlanmıştır. Sert malzemelerde kopma dayanımının yüksek olması sadece düşük ilerleme ve talaş derinliğinin tercih edilmesini değil aynı zamanda takım, kater, ayna ve punta bağlantısının yeterince rijit olmasını gerekli kılmaktadır.

İşleme deneyleri, Tezmaxsan firması tarafından üretilen 20 hp gücünde , 4000 rpm devir sayısına sahip CNC torna tezgahında yapılmıştır.

Ölçüm işlemlerinde kullanılan cihazların kalibrasyonu yapılmış ve alınan üç farklı değer aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Akım değeri için UNI-T UT 201 model Pensampermetre kullanılmıştır. Bir fazdan geçen akım değeri alınmıştır. Bu değer gerilim ve süre ile çarpılarak, belirli bir miktar talaş kaldırması için gereken güç tüketimi hesaplanmıştır. Ses şiddetinin ölçümü için LT SL-401 model ses şiddeti ölçüm cihazı talaş kaldırma bölgesinden 50 cm uzağa yerleştirilmiştir. Filtre A ve slow pozisyonundan ölçüm alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değeri için işleme deneyi biter bitmez ölçümler 3 ayrı noktada alınmış ve aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. Mitutyoyo SJ 201 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Veriler minitap 16 istatistiksel paket programı kullanılarak analiz edilmiş ve 3D grafikler çıkartılmıştır.

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bir son tornalama işlemi olarak sert tornalamada en önemli işlenebilirlik parametresi yüzey pürüzlülük değeridir. Yüzey pürüzlülük değerinin taşlama kalitesine yakın olması istenir. Yüzey pürüzlülük değerinin böylesine az olması, makinanın verimli çalışmasını sağlar. Sürtünmenin düşük olması makine ömrünün uzun olmasını sağlar. Bundan dolayı önemli bir inceleme konusudur. Tablo 1 de deneylerde kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

<i>Den. No</i>	<i>a (mm)</i>	<i>v (m/min)</i>	<i>f mm/rev)</i>	<i>Yüzey Pürüzlülüğü (µm)</i>
1	0,1	175	0,06	0,46
2	0,1	175	0,12	1,43
3	0,1	175	0,18	2,51
4	0,1	200	0,06	0,44
5	0,1	200	0,12	1,41
6	0,1	200	0,18	2,6
7	0,1	225	0,06	0,41
8	0,1	225	0,12	1,42
9	0,1	225	0,18	2,84
10	0,15	175	0,06	0,44
11	0,15	175	0,12	1,43
12	0,15	175	0,18	2,46
13	0,15	200	0,06	0,38
14	0,15	200	0,12	1,31
15	0,15	200	0,18	2,44
16	0,15	225	0,06	0,37
17	0,15	225	0,12	1,34
18	0,15	225	0,18	2,61
19	0,2	175	0,06	0,39
20	0,2	175	0,12	1,43
21	0,2	175	0,18	2,64
22	0,2	200	0,06	0,42
23	0,2	200	0,12	1,14
24	0,2	200	0,18	2,74
25	0,2	225	0,06	0,38
26	0,2	225	0,12	1,36
27	0,2	225	0,18	2,57

Kesme parametrelerine ve Bor ve su karşışımından oluşan soğutma sıvısı kullanımına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri bazı deney şartlarında karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

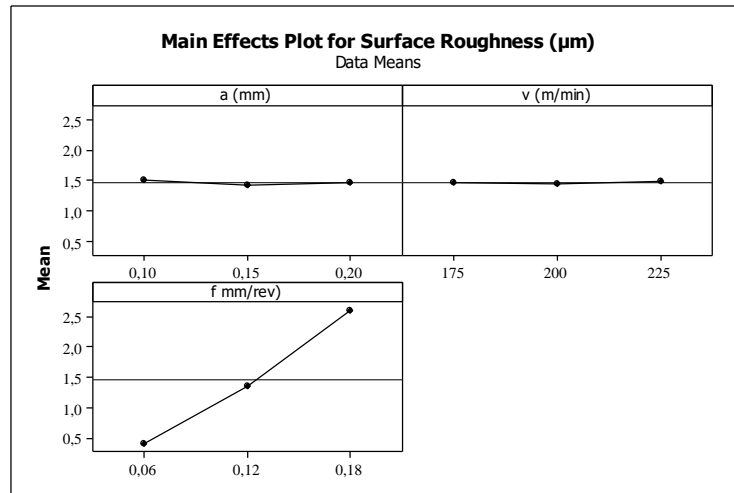
En yüksek talaş derinliği için soğutma sıvısının etkilerinin incelemek üzere, kuru ve soğutma sıvılı kesme deneyleri tekrarlanmıştır.

**Tablo 2.** Kesme Parametrelerine Ve Soğutma Sıvısı Kullanımına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

Exp. no	a (mm)	v (m/min)	f mm/rev)	Soğutma sıvısız Ra	Soğutma sıvılı Ra
19	0,2	175	0,06	0,39	0,53
20	0,2	175	0,12	1,43	1,42
21	0,2	175	0,18	2,64	2,46
22	0,2	200	0,06	0,42	0,49
23	0,2	200	0,12	1,14	1,22
24	0,2	200	0,18	2,74	2,48
25	0,2	225	0,06	0,38	0,36
26	0,2	225	0,12	1,36	1,37
27	0,2	225	0,18	2,57	2,59

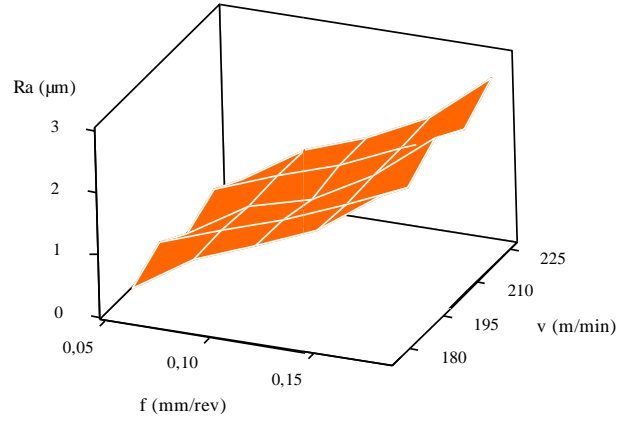
Sadece soğutma sıvısının etkilerinin gözlenmesi için 9 tane ilave deney yapılmıştır. Böylelikle işleme süresi ve maliyeti sınırlandırılmıştır. Tablo 2'ye bakıldığında soğutma sıvısı kullanımına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde kayda değer bir değişim olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi deneylerde kullanılan CBN uçlarla sıcaklığın artmaması olarak gösterilebilir.

Şekil 1'de Taguchi "en küçük en iyi" yaklaşımına göre ana etki grafikleri verilmiştir [19-20]. Tablo 1 ve Tablo 2 de Full faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Bundan dolayı ortalama değerler alınmıştır. Böylelikle kesme parametrelerinin etkileri açıklanmıştır. Şekil 2'de ise kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim yüzey grafiği şeklinde verilmiştir.

**Şekil 1.** Yüzey pürüzlülüğü ana etki grafikleri

Şekil 1'deki ana etki grafiklerine göre yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen kesme parametresi ilerleme hızıdır. S/N grafikleri yerine ortalama etki grafikleri tercih edilmiştir. Böylelikle ortalama değerlerin gösterilmesi sağlanmıştır. S/N grafikleri ile main effect grafikleri aynı değerlerin farklı şekillerde gösterimine karşılık gelmektedir. Şekil 1 ana etki grafiği ve Şekil 2'deki yüzey grafiğine bakıldığında da ilerle miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı açıkça görülmektedir. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. [21]–[24]. İlerleme miktarındaki artış ile yüzeydeki helis kanalların derinliğini artar ve helis kanallarındaki derinlik de yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olur. Talaş derinliğinin ve kesme hızının artmasının yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok fazla bir etkisi görülmemiştir. Tezgâhtaki aşınmalara bağlı olarak rijitlik bozulduğu zaman pürüzlülük değeri talaş derinliği ile artar. Kesme hızındaki artışta benzer şekilde

pürüzlülükte önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. Çünkü artan devir sayısı tezgâhta önemli bir titreşim oluşturmamıştır. Özellikle yeni tezgâhlarda düşük talaş derinliği ve yüksek kesme hızı tercih edilir. Bunun sebebi artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerinin azalması ve daha iyi bir kesme sağlanmasıdır.



Şekil 2. Kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim

Grafiklerdeki mes aralıkları geniş seçilmiştir. Böylelikle daha lineer bir grafik elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle Kesme parametrelerin etkilerinin farkedilmesi anlamında kolaylık sağlamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü için matematiksel modele göre hesaplanan değerler ve deneyler sonucunda elde edilen değerler Tablo 3’de verilmiştir. Tüm kesme parametreleri için varyans analizi ve regresyon analizi Tablo 3’te verilmiştir. Tablo 3 te herbir parametrenin etki oranları verilmiştir. %95 (P<0.05) güven aralığına göre parametrelerin önemli bir etkisi olup olmadığı açıklanmıştır. Ra değeri yüzey pürüzlülük değerini göstermektedir.

Tablo 3. Yüzey Pürüzlülüğü İçin Varyans Analizi Sonuçları (µm)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	% Cont.
<b>Regression</b>	9	21,8074	21,8074	2,4230	312,88	0,000	99,40
<b>Linear</b>	3	21,6163	21,6163	7,2054	930,43	0,000	98,53
<b>a (mm)</b>	1	0,0113	0,0112	0,0112	1,45	0,245	0,05
<b>v (m/min)</b>	1	0,0007	0,0007	0,0007	0,09	0,772	0,00
<b>f mm/rev)</b>	1	21,6044	21,6044	21,6044	2789,74	0,000	98,47
<b>Square</b>	3	0,1509	0,1509	0,0503	6,49	0,004	0,69
<b>a (mm)*a (mm)</b>	1	0,0196	0,0196	0,0196	2,54	0,130	0,09
<b>v (m/min)*v (m/min)</b>	1	0,0099	0,0099	0,0099	1,27	0,275	0,05
<b>f mm/rev)*f mm/rev)</b>	1	0,1214	0,1214	0,1214	15,67	0,001	0,55
<b>Interaction</b>	3	0,0402	0,0402	0,0134	1,73	0,199	0,18
<b>a (mm)*v (m/min)</b>	1	0,0147	0,0147	0,0147	1,90	0,186	0,07
<b>a (mm)*f mm/rev)</b>	1	0,0012	0,0012	0,0012	0,15	0,699	0,01
<b>v (m/min)*f mm/rev)</b>	1	0,0243	0,0243	0,0243	3,14	0,094	0,11
<b>Residual Error</b>	17	0,1317	0,1317	0,0077			0,60
<b>Total</b>	26	21,9390					100,00

$$Ra = +2,75259 - 2,16667*a - 0,0251111*v + 2,27778*f + 22,8889*a*a + 6,48889E-05*v*v + 39,5062*f*f - 0,0280000*a*v + 3,33333*a*f + 0,0300000*v*f$$

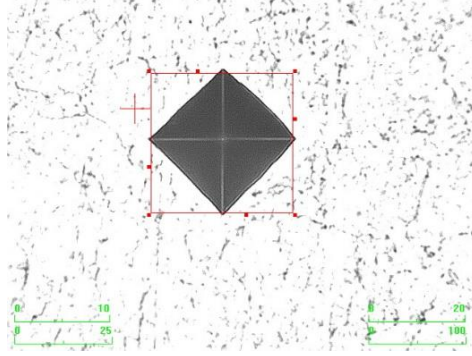
$$S = 0,0880013 \quad PRESS = 0,339870$$

$$R-Sq = 99,40\% \quad R-Sq(pred) = 98,45\% \quad R-Sq(adj) = 99,08\%$$

#### 4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI (CHARACTERIZATION STUDIES)

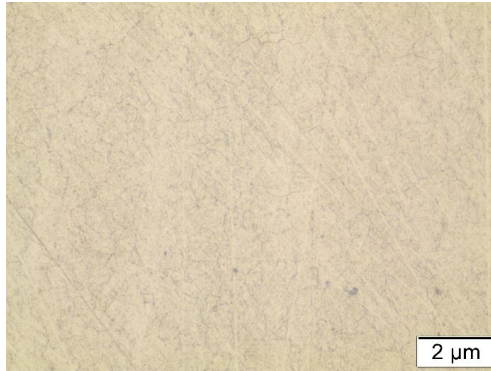
Bu çalışmada ayrıca DIN 1.2367 çelik malzemesi için karakterizasyon çalışması yapılmış ve malzemenin mekanik özellikleriyle ilgili detaylı bir bilgi elde edilmiştir. Bu bilgiler sert tornalama sürecinde parametreleri belirlerken oldukça büyük bir öneme arz eder.

DIN 1.2367 çelik malzemesinin yüzeyinden alınan mikrosertlik ölçüm izi görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.



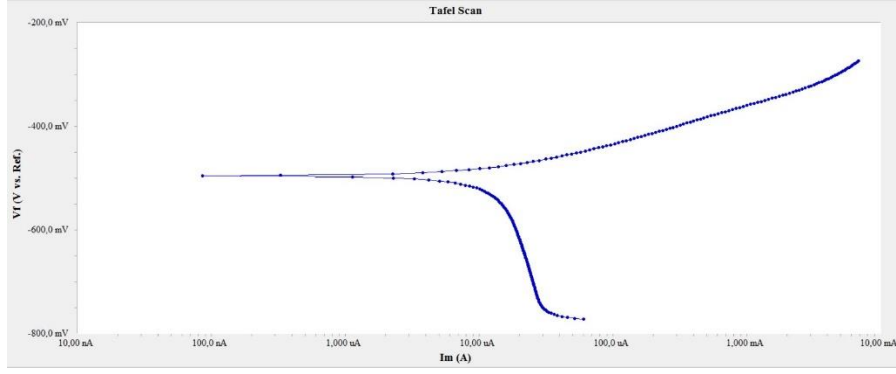
Şekil 3. DIN 1.2367 çelik malzemesinin mikrosertlik ölçüm izi

DIN 1.2367 çelik malzemesinin sertlik değeri yaklaşık olarak 715 HV<sub>0.5</sub> olarak ölçülmüştür. DIN 1.2367 çelik malzemesinin mikrosertlik ölçümleri beşer farklı sertlik değeri elde edilmiş ve bu verilerin ortalaması alınarak sertlik değeri tespit edilmiştir. Malzemeye uygulanan ısıl işlemden sonra yapılan yağda soğutma işlemi DIN 1.2367 çeliğinin sertliğinde yüksek oranda artış meydana getirmiştir. Yağda soğutma işlemin ani olarak yapılması malzeme martenzit bir yapı ortaya çıkarmıştır (Şekil 4) ve bu yapı sertlikte artış meydana getirmiştir. Buna ek olarak, 1.2367 malzemesinin çekme ve aşınma muakavemeti oldukça yüksektir. Bu malzeme genel olarak sıcaklıkta sertliğini korur ve yüksek tokluğa sahip olan bir çeliktir. 1.2367 çeliği, tane sınırlarında karbür çökeltisi meydana getirmez ve Şekil 4'te verilen optik mikroskop görüntüsünde belirtildiği gibi ince taneli mikro yapıya sahip çeliktir [25].



Şekil 4. DIN 1.2367 çelik malzemesinin optik mikroskop görüntüsü

DIN 1.2367 çelik malzemesinin korozyon deneyi hazırlanan % 3.5 NaCl çözeltisinde yapılmıştır. Deneyler sonucunda oluşan potansiyodinamik polarizasyon eğrisi, Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. DIN 1.2367 çelik malzemesinin tafel eğrisi

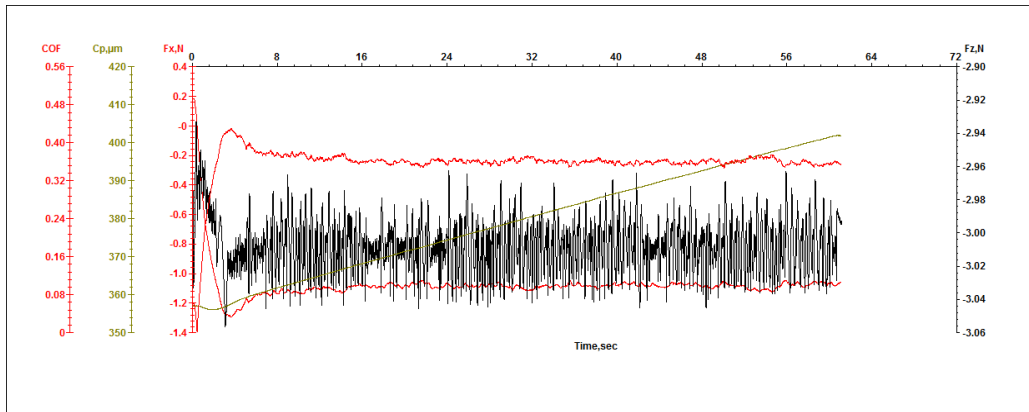
Potansiyel, -0.50 mV ile 0.50 mV sonrasında açık devre potansiyeline karşı uygulanmıştır. 30 dakika daldırma süresi uygulanmıştır.  $E_{corr}$  (korozyon potansiyeli),  $I_{corr}$  (korozyon akımı),  $\beta_a$  (anodik tafel eğrisi),  $\beta_c$  (katodik tafel eğrisi) ve korozyon hızı tafel eğrilerinden tespit edilmiştir.  $R_p$  (korozyon direnci) ise Stern ve Geary denklemi (denklem 1) kullanılarak hesaplanmıştır [26].

Tablo 4. DIN 1.2367 çelik malzemesinin korozyon sonrası elektrokimyasal sonuçları

Materials	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ ( $\mu A cm^{-2}$ )	$B_a$ (mV)	$B_c$ (mV)	Corrosion rate (mpy)	Korozyon direnci ( $k\Omega.cm^2$ )
DIN 1.2367	-495	18,5	80,6	148,9	4,219	1,2273

Tablo 4'te verilen veriler incelendiğinde DIN 1.2367 çelik malzemesinin korozyon direnci -495 mV değere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca,  $R_p$  (korozyon direnci)  $1,2273 k\Omega.cm^2$  olarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilerden, DIN 1.2367 çelik malzemesinin korozyon direnci arttığı açıkça görülmektedir. DIN 1.2367 çelik malzemesi için literatürde benzer sonuçlara rastlanılmaktadır [27].

Yağda ani sertleştirilmiş DIN 1.2367 çelik malzemesinin aşınmaya karşı davranışını ve mekanik özelliklerini tespit edebilmek amacıyla malzemeye çizik testi uygulanmıştır. 1.2367 çeliğinin çizik testi grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. DIN 1.2367 çelik malzemesinin çizik testi grafiği

Şekil 6'da verilen çizik testi grafik incelendiğinde DIN 1.2367 çelik malzemesinin sürtünme katsayısı  $\sim 0.35$  olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum sert fazların mikroyapıda bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. DIN 1.2367 çelik malzemesinin mikroyapısında oluşan bu sert fazlar dispersiyon mukavemeti ile malzemeye mukavemet kazandırmıştır. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda DIN 1.2367 çelik malzemesinin aşınma karşı dirençli olduğu açıkça söylenebilir.

#### 4. GENEL SONUÇLAR (GENERAL RESULTS)

Deneyisel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre;

- Sert tormalama işlemine uygun takımlar kullanılarak, uygun tezgâhlarda ve optimum kesme parametreleri ile taşlama kalitesinde yüzey elde edilebileceği görülmüştür.
- Yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen kesme parametresi ilerleme hızıdır ve ilerleme miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır. İlerleme miktarındaki artış ile yüzey pürüzlülük değerinin artması, yüzeydeki helis kanalların derinliğini ilerleme hızındaki artış ile artması ile açıklanabilir. Düşük bir yüzey pürüzlülük değeri için düşük ilerleme miktarı tercih edilir.
- Talaş derinliğinin ve kesme hızının artmasının yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok fazla bir etkisi görülmemiştir. Tezgâhtaki aşınmalara bağlı olarak rijitlik bozulduğu zaman pürüzlülük değeri, talaş derinliği ile artar. Bu bağlamda deneylerde kullanılan tezgâhın rijit bir tezgâh olduğu ve yüzey kalitesini bozmadığı söylenebilir.
- Kesme hızındaki artışta benzer şekilde pürüzlülükte önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. Çünkü artan devir sayısı tezgâhta önemli bir titreşim oluşturmamıştır. Özellikle yeni tezgâhlarda düşük talaş derinliği ve yüksek kesme hızı tercih edilir. Bunun sebebi artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerinin azalması ve daha iyi bir kesme sağlanmasıdır.
- Kesme hızı ve talaş derinliği bir miktar artırılarak işleme süresi azaltılırken, ilerleme miktarı azaltılarak yüzey kalitesi artırılabilir.



#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Rastorguev, A. Sevastyanov, Diagnostics of chip formation and surface quality by parameters of the main drive current in the hard turning. *Materials Today: Proceedings*, 19 (2019) 1845-1851.
- [2] A. Das, S. K. Patel, T. K. Hotta, B. B. Biswal, Statistical analysis of different machining characteristics of EN-24 alloy steel during dry hard turning with multilayer coated cermet inserts. *Measurement*, 134 (2019) 123-141.
- [3] A. Attanasio, M. Gelfi, C. Giardini, C. Remino, Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. *Wear*, 260: 3 (2006) 333-338.
- [4] K. He, M. Gao, Z. Zhao, Soft computing techniques for surface roughness prediction in hard turning: A literature review. *IEEE Access*, 7 (2019) 89556-89569.
- [5] A. Das, N. Tirkey, S. K. Patel, S. R. Das, B. B. Biswal, A comparison of machinability in hard turning of EN-24 alloy steel under mist cooled and dry cutting environments with a coated cermet tool. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19: 1 (2019) 115-130.
- [6] N. S. Narayanan, N. Baskar, M. Ganesan, Multi Objective Optimization of Machining Parameters for Hard Turning OHNS/AISI H13 Material, Using Genetic Algorithm. *Materials Today: Proceedings*, 5: 2 (2018) 6897-6905.
- [7] A. Das, S. K. Patel, B. B. Biswal, S. R. Das, Machinability investigation and cost estimation during finish dry hard turning of AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts. *Journal of Superhard Materials*, 41: 4 (2019) 247-264.
- [8] A. Panda, S. R. Das, D. Dhupal, Surface roughness analysis for economical feasibility study of coated ceramic tool in hard turning operation. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1: 4 (2017) 237-249.
- [9] K. V. Subbaiah, C. Raju, R. S. Pawade, C. Suresh, Machinability investigation with wiper ceramic insert and optimization during the hard turning of AISI 4340 steel. *Materials Today: Proceedings*, 18 (2019) 445-454.
- [10] A. Elkaseer, A. Abdelaziz, M. Saber, A. Nassef, FEM-Based Study of precision hard turning of stainless steel 316L. *Materials*, 12: 16 (2019) 2522.



- [11] P. Umamaheswarrao, D. R. Raju, K. Suman, B. R. Sankar, TOPSIS Based Optimization of Process Parameters While Hard Turning of AISI 52100 Steel. *Acta Mechanica Malaysia (AMM)*, 2: 2 (2019) 28-31.
- [12] S. K. Thangarasu, S. Shankar, Tool wear prediction in hard turning of EN8 steel using cutting force and surface roughness with artificial neural network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234: 1 (2020) 329-342.
- [13] A. A. Vladimirov, A. V. Makarov, E. M. Martynov, Using vibration cutting for finish turning hard materials. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1399: 4 (2019) 044013.
- [14] V. Chandra, S. Ghosh, P. V. Rao, Investigation on Machining Responses during Hard Turning of AISI D2 Steel under Dry, Wet and Nano-based MQL Conditions. In *Advances in Forming, Machining and Automation* (2019) 495-504.
- [15] A. Panda, S. R. Das, D. Dhupal, Statistical Analysis of Surface Roughness Using RSM in Hard Turning of AISI 4340 Steel with Ceramic Tool. In *Advances in Industrial and Production Engineering* (2019) 17-26.
- [16] N. Ambhore, D. Kamble, S. Chinchankar, Evaluation of Cutting Tool Vibration and Surface Roughness in Hard Turning of AISI 52100 Steel: An Experimental and ANN Approach. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, (2019) 1-8.
- [17] M. J. Mir, M. F. Wani, S. Banday, S. Mushtaq, J. Khan, J. Singh, S. S. Saleem, Comparative assessment of coated CBN and multilayer coated carbide tools on tool wear in hard turning AISI D2 steel. In *Proceedings of TRIBOINDIA-2018 An International Conference on Tribology* (2018).
- [18] A. Şahinoğlu, M. Rafighi, Optimization of cutting parameters with respect to roughness for machining of hardened AISI 1040 steel. *Materials Testing*, 62: 1 (2020) 85-95.
- [19] B. Gür, A. K., Yildiz, T., Icen, Theoretical evaluation of abrasive wear behavior of B4C/FeCrC coating layer evaluated by a Taguchi approach. *Mater. Test.*, 62:7, (2020) 733–738.
- [20] B. Gür, A. K., Özyay, C., Icen, Evaluation of B4c/Ti Coating Layer, Investigation of Abrasive Wear Behaviors Using Taguchi Technique and Response Surface Methodology. *Surf. Rev. Lett.*, 27:10, (2020) 19502251.
- [21] M. Elbah, M. A. Yallese, H. Aouici, T. Mabrouki, J. F. Rigal, Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel. *Measurement*, 46: 9 (2013) 3041-3056.
- [22] E. Aslan, N. Camuşcu, B. Birgören, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiCN mixed ceramic tool. *Materials & design*, 28: 5 (2007) 1618-1622.
- [23] I. Asiltürk, H. Akkuş, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 44: 9 (2011) 1697-1704.
- [24] S. R. Das, D. Dhupal, A. Kumar, Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool. *Measurement*, 62 (2015) 108-126.
- [25] X. Chuangwen, X. Ting, L. Huaiyuan, S. Zhicheng, J. Hongbing, L. Mandong, Friction, wear, and cutting tests on 022Cr17Ni12Mo2 stainless steel under minimum quantity lubrication conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90: 1-4 (2017) 677-689.
- [26] M. Stern, A. L. Geary, Electrochemical polarization I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of the electrochemical society*. 104: 1 (1957) 56-63.
- [27] B. Yalçın, B. Ergene, S. Nar, 1.2367 Takım Çeliğinden İmal Edilmiş Enjeksiyon Yolluk Burcunda Hasar Analizi ve Geometrik Tasarımda İyileştirme ile Hasarı Önleme. *SDU International Journal of Technological Science*, 11: 3 (2019)

## Spatial Distribution Optimization of Wind Power Plants to be Installed in Turkey to Minimize Wind Power Ramp Events

 İsrail KARADÖL<sup>1\*</sup>  Ceyhan YILDIZ<sup>2</sup>  Mustafa ŞEKKELİ<sup>3</sup> 
<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electricity and Energy, 79000, Mehmet Şanlı/KİLİS

<sup>2</sup>K.Maraş İstiklal University, Elbistan Vocational School, Department of Electricity and Energy, 46300, Elbistan/K.MARAŞ

<sup>3</sup>K.Maraş Sütçü İmam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 46040, Onikişubat/K.MARAŞ

### Graphical/Tabular Abstract

Interest in renewable energy sources is increasing day by day. Wind energy has attracted important attention as a renewable energy source. However, the random variation of wind energy causes a disruptive effect on the power-frequency balance of the traditional grid systems.

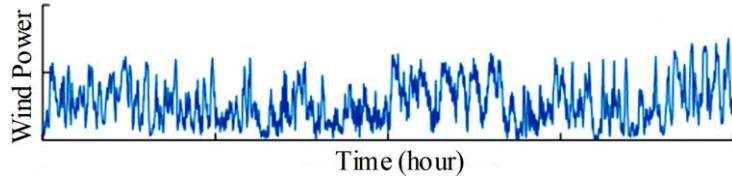


Figure A. Wind power variation

### Article Info:

Research article

Received: 30/03/2020

Revision: 18/09/2020

Accepted: 18/11/2020

### Highlights

- Wind Power Ramp.
- Grid power-frequency balance.
- Matlab

### Keywords

Wind Energy  
Ramp  
Optimization  
Genetic Algorithm

**Purpose:** In this study, an optimization model has been proposed for determining the optimal spatial distribution of Wind Power Plants (WPP) to minimize wind power ramp.

**Theory and Methods:** The developed optimization model considers wind power ramps. Histogram graphics were used to evaluate ramp events. The objective function of the developed optimization model gives the area under histogram graphics. Genetic Algorithm (GA) was used to solve the optimization model.

**Results:** The ramp events of WPP generations in Turkey were evaluated. As a result of the evaluations, the smallest 13.29%, the largest 41.91% increase, and the smallest 9.45% and the largest 37.26% decrease were observed for WPP generations. The optimization process realized in this study indicated that these ramp events seen in Turkey can be reduced by 40%.

**Conclusion:** This study indicated that the proposed optimization methodology can effectively determine candidate WPP regions that have minimum ramp events.



## Rüzgar Gücü Rampa Olaylarını En Aza İndirmek İçin Türkiye'de Kurulacak Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Konumsal Dağılım Optimizasyonu

İsrafil KARADÖL<sup>1,\*</sup>  Ceyhun YILDIZ<sup>2</sup>  Mustafa ŞEKKELİ<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 79000, Mehmet Şanlı/KİLİS

<sup>2</sup>K.Maraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 46300, Elbistan/K.MARAŞ

<sup>3</sup>K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 46040, Onikişubat/K.MARAŞ

### Öz

Yenilenebilir enerji kaynaklarının iklimsel koşullara bağlı olarak rastgele değişkenlik göstermesi, geleneksel şebeke sisteminin güç frekans dengesi üzerinde bozucu etki yaratmaktadır. Yapılan bu çalışmada, rüzgâr enerjisi santralleri (RES) üretimlerinde görülen rampalar analiz edilmiştir. Ayrıca, Türkiye'deki mevcut tesis üretimlerinde görülen rampa olayları dikkate alınarak, yeni kurulacak tesislerdeki rampa olaylarını minimize edecek, tesis dağılımını belirleyen bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Önerilen bu model Genetik Algoritma (GA) kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, yüzde rampa değerlerinin oluşturduğu histogram eğrilerinin altında kalan alanlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda, ülkedeki mevcut RES tesislerinin 1, 3 ve 6 saatlik rampa değerlerinin 2017 yılında sırasıyla 16.61, 41.32 ve 59.94 olduğu, 2018 yılında ise bu değerlerin sırasıyla 18.10, 40.49 ve 63.52 olduğu gözlenmiştir. Önerilen optimizasyon yönteminin çözümüyle elde edilen RES yerleşiminde 1, 3 ve 6 saatlik yüzde rampa değerlerinin histogram eğrilerinin altında kalan alanların ise sırasıyla 2017 yılında 9.98, 23.65 ve 30.97 olduğu, 2018 yılında ise bu değerlerin sırasıyla 11.01, 25.65 ve 39.14 olduğu görülmüştür. Yeni tesis kurulumlarında, bu çalışmada önerilen yöntem ile elde edilen tesis kümesinin bölgelere dağılımının dikkate alınması durumunda oluşacak rampa olaylarının minimize edilebileceği öngörülmektedir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 30/03/2020  
Düzeltilme: 18/09/2020  
Kabul: 18/11/2020

### Anahtar Kelimeler

Rüzgar Enerjisi  
Rampa  
Optimizasyon  
Genetik Algoritma

### Keywords

Wind Energy  
Ramp  
Optimization  
Genetic Algorithm

## Spatial Distribution Optimization of Wind Power Plants to be Installed in Turkey to Minimize Wind Power Ramp Events

### Abstract

The random variation of renewable energy sources depending on climatic conditions causes detrimental effects on the power frequency balance of the traditional grid system. In this study, the ramps seen in wind power plants (WPP) generations are analyzed. In addition, an optimization model has been proposed that determines the plant distribution to minimize ramp events in new plants by taking into account the ramp events seen in existing plant generations of Turkey. This proposed model has been solved using the Genetic Algorithm (GA). The results are evaluated by taking into account the areas below the histogram curves obtained from percentage ramp values. As a result of these assessments, it is observed that the current RES facilities in the country have histogram areas of 16.61, 41.32 and 59.94 in 2017, and in 2018 these values are 18.10, 40.49 and 63.52 respectively. In the WPP spatial distribution obtained by the solution of the proposed optimization method, it is observed that 1, 3 and 6 hour percentage ramp values have 9.98, 23.65 and 30.97 areas, respectively in 2017, and in 2018 these values are 11.01, 25.65 and 39.14 respectively. In new plant installations, it is envisaged that if the distribution of the plant cluster to the regions obtained by the method proposed in this study is taken into account, the ramp events will be minimized.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de şebekeye bağlı rüzgâr enerjisi üretimi son 11 yılda büyük artış göstermiştir. 2008 yılında toplam kurulu güç 364 MW iken 2019 yılında 7615 MW kadar yükselmiştir. Özellikle 2015 ve öncesinde her yıl minimum %25’lik bir büyüme gerçekleştirmiştir[1]. 2019 yılsonu enerji raporlarına göre Türkiye’nin toplam kurulu gücü 90420 MW ve bu kurulu gücün %7,4’ü rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisi, ülkemizin rüzgâr potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise mevcut potansiyelin sadece %15,86’lık kısmı kullanılmaktadır[2], [3]. Mevcut potansiyelinden dolayı rüzgâr enerjisindeki büyümenin ilerleyen yıllarda da devam edeceği öngörülmektedir. Rüzgâr enerjisinde üretimin artırılması, şebeke sistemleri üzerindeki üretim-tüketim yönetimini zorlaştırmaktadır. Çünkü yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu gibi rastgele bulunabilirlik faktörleri nedeniyle kararsız bir karakteristiğe sahiptir[4]. RES üretimlerindeki bu kararsızlık, sistem esnekliği ve güvenliği açısından büyük sorunlara neden olmaktadır[5]–[10].

Rüzgâr enerjisi genel olarak değerlendirildiğinde hızla değişebilen bir yapıya sahiptir [11]. Sistem esnekliği, güvenilirliği ve maliyetleri açısından, RES üretiminin hızla değiştiği zamanlar büyük sorunlara neden olmaktadır[11]. Çünkü RES üretiminde görülen ani düşüş sonucunda sistem operatörleri üzerindeki üretim kaybını telafi etmek için ya çevrim içi tesislerin üretimleri yükseltilecek ya da çevrimdışı herhangi bir tesis devreye alınacaktır. Ters bir durumda yani rüzgâr üretiminin anlık artmasında ise tesislerin yük atması, kapatılması veya çevrimiçi bazı tesis üretimlerinin azaltılması gibi önlemler alınmaktadır[12], [13]. RES üretimlerindeki tüm bu ani (pozitif ve negatif yönlü) değişimler, genel bir ifadeyle rampa olarak tanımlanmaktadır[14].

RES üretimlerindeki rampa olaylarını karakterize etmek (rampa hızını, süresini, büyüklüğünü, zamanlamasını) sistem güvenliği, esnekliği ve maliyet açısından önemlidir[13], [15]. Çünkü rüzgâr rampa olayı esnasında bazı tesislerin devreye alınması hemen gerçekleştirilememektedir veya tesisin devreye alınması yüksek maliyetler gerektirmektedir. Bu nedenlerle RES üretimlerindeki rampa olaylarının önceden tahmin edilmesi büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca rampanın büyüklüğünün ve süresinin bilinmesi, rampayı dengelemek için gereken kapasitenin ve enerjinin sağlanmasında da büyük önem arz etmektedir. Bu alanla ilgili literatür taraması yapıldığında; Sevlıan ve Rajgopal, ilk önce optimum rampa algılama algoritması geliştirmişler ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [16]. Florita ve diğ. ark. güneş ve rüzgar enerjisi rampa olaylarının tanımlanmasını, veri sıkıştırma tekniği kullanarak göstermişlerdir[17]. Zhao ve diğ. ark., rüzgar enerjisi rampa verilerinin özelliklerini incelemek için aşırı değer teorisi uygulanmış ve büyük rüzgar enerjisi rampalarını modellemek için genelleştirilmiş Pareto dağılımını kullanmışlardır[18]. Mishra ve diğ. ark., öncelikle veri ön işleme amacıyla hareketli ortalama filtresi, gürültü çıkarma ve güç salınımlarını ayırma yöntemlerini kullanmışlardır. Ayrıca veri analizine yönelik K-ortalama algoritması yöntemini kullanarak rampa olaylarını tanımlamışlardır[4]. Couto ve diğ. ark. iklimsel verilerden faydalanarak rüzgar enerjisi rampa olayları tahminini gerçekleştirmişlerdir[19]. Rüzgâr enerjisi rampa olaylarının belirlenmesi alanında daha birçok inceleme yapılmıştır[20]–[24]. Ayrıca Ouyang ve diğ. ark. rampa olaylarının tanımlanma yöntemlerini ve rampa olaylarına dayalı mevcut tahmin modellerini inceleyerek bu yöntemleri anlatmışlardır[25]. Bu çalışmayı ilgili alanda yapılan diğer çalışmadan ayıran en önemli özellikler;

- Türkiye’de ilk defa RES üretimlerindeki rampa olayları incelenmiştir.
- RES üretimlerindeki rampa olaylarının azaltılabilmesi (rampa olaylarının en düşük olduğu tesis kümesini belirleyerek bu tesislerin optimum çalışmasını sağlamak) yönünde yeni bir bakış açısı ortaya koyulmuştur.
- Ayrıca Türkiye ölçeğinde yeni RES kurulumlarında meydana gelebilecek rampaların minimum büyüklükte gerçekleşmesi için GA kullanılarak tesislerin illere göre dağılımları hesaplanmıştır (Ek 1).

Bu çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Türkiye’nin rüzgâr enerjisi hakkında genel bilgiler verilmiş ve RES üretimlerinde görülen rampa olayı tanımlanmıştır. Ayrıca ilgili alanda yapılan çalışmaların literatür taramaları verilmiştir. İkinci bölümde çalışmada kullanılan RES üretimleri hakkında genel bilgiler, Türkiye illere göre RES kurulu güç haritası ve 2017-2018 yıllarına ait ortalama per-unit üretimler verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan genetik algoritma ve algoritma şeması tanıtılmıştır. Bu

bölümde algoritmada çözümü gerçekleştirilen fonksiyonun bir kısmı olan yamuk kuralı açıklanmıştır. Dördüncü bölümde GA yardımıyla çözümü gerçekleştirilen fonksiyonun sonuçları verilmiştir. Beşinci bölümde bulgular bölümünde elde edilen grafiklerin yorumlamaları gerçekleştirilmiştir.

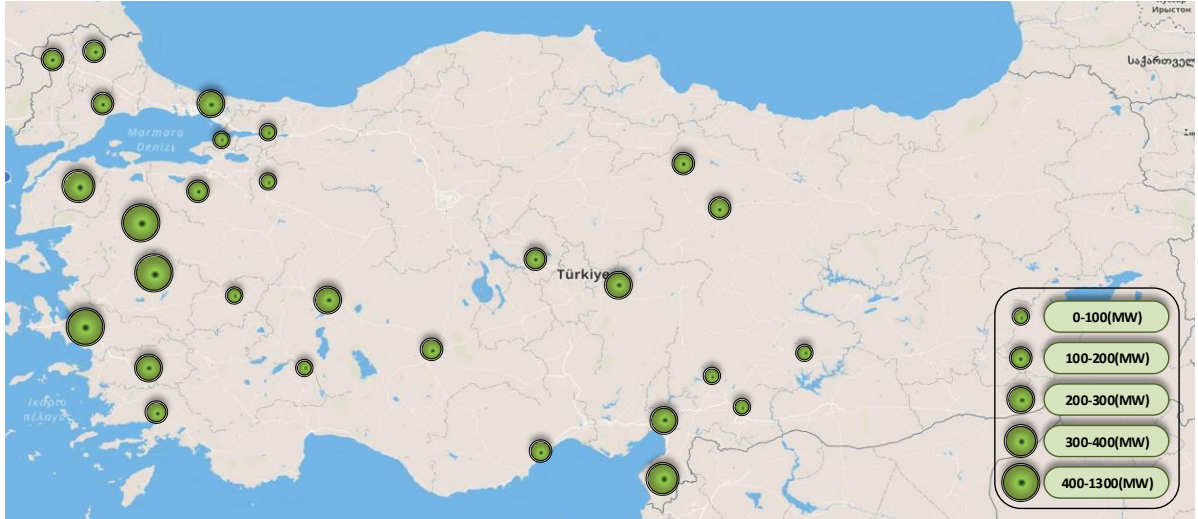
## 2. TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALLARI (WIND POWER PLANTS OF TURKEY)

Dünyada yenilenebilir enerjiye verilen önem her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en hızlı gelişim gösteren kaynaklar rüzgâr ve güneş enerjisidir. Türkiye’de de rüzgâr enerjisi kullanımı alanında son 20 yılda büyük atılımlar gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr enerjisindeki hızlı büyüme beraberinde bazı sorunları da getirmiştir. Bu alandaki en başlıca sorun rüzgâr üretimlerinde görülen rampa olaylarıdır. Rüzgâr enerjisine ait rampa olaylarını incelemek ve azaltmak amacıyla öncelikle ülkedeki RES üretimleri incelenmiştir. Bu inceleme, için tesislere ait üretim verilerinin Türkiye Elektrik İletim AŞ’den (TEİAŞ) elde edilmesiyle başlamıştır. Elde edilen veriler, Türkiye’de kurulu ve aktif olarak faaliyet gösteren 161 santrale aittir. Bu veriler 1’er saatlik periyotlarda olup, 2017-2018 yıllarına aittir. Ayrıca çalışmada kullanılan verilerin bazı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Verilere ait bazı özellikler

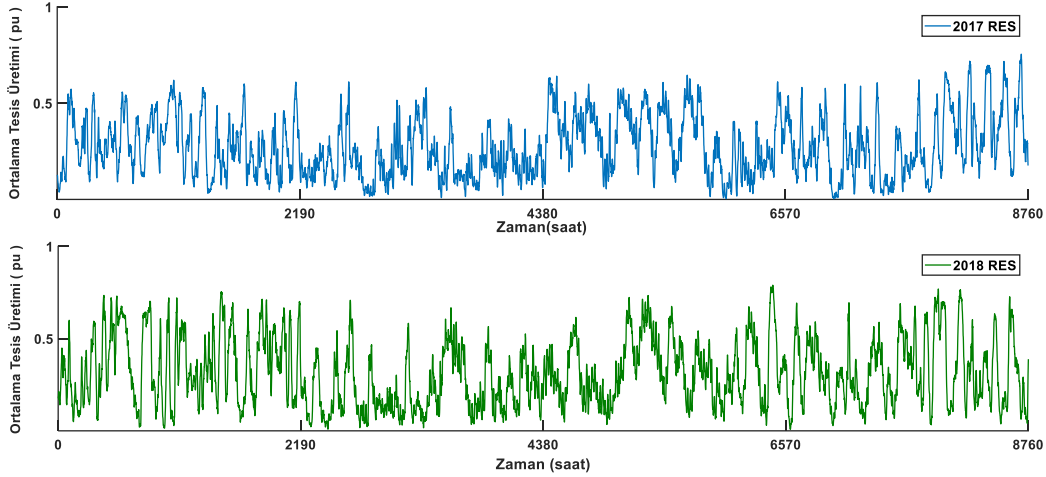
Özellik	Değer
Tesis Sayısı	161
Toplam Kurulu Güç (MW)	6610.67
Çalışma Süresi	01.01.2017 – 01.01.2019
Bir Tesis için Veri Sayısı	17520

Tesislere ait yıllık enerji üretimindeki değişimler incelenirken, ülkedeki tüm tesislerin saatlik ortalama üretimleri alınmıştır. GA yardımı ile istenen fonksiyonun çözümü aşamasında ise her bir santrale ait üretimler kullanılmıştır. Kullanılan her bir tesis üretimi, kendi kurulu gücüne bölünerek per-unit (pu) üretim değerlerine dönüştürülmüştür. Çünkü büyük güçlü tesislerde büyük oranlarda değişimler görülmektedir. Tesis üretimlerinin pu değerlerine çevrilmesi sayesinde tesislere ait üretim karakteristikleri elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tesislere ait kurulu güç haritası Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** İllere göre RES kurulu güç dağılımı

Ayrıca Türkiye’de Kurulu tesislere ait 2017-2018 yılları saatlik ortalama üretimleri Şekil 2’de gösterilmiştir. RES üretimlerinde görülen değişimler şebeke sistemin işletilmesinde zorluklara neden olmaktadır.



Şekil 2. Türkiye'deki RES'lerin saatlik ortalama üretimleri

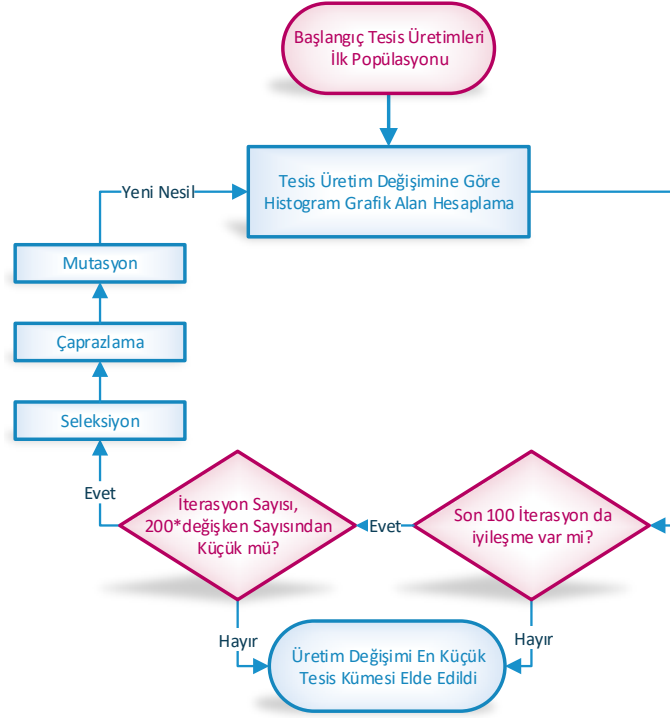
### 3. GA KULLANARAK RAMPA HİSTOGRAM ALANLARININ MİNİMİZASYONU (MINIMIZATION OF RAMP HISTOGRAM AREAS USING GA)

Bu çalışmada Türkiye'de Kurulu RES üretimlerindeki rampa olaylarını analiz etmek ve bu analizler sonrasında ülke geneli yeni kurulacak tesis üretimlerindeki rampa olaylarının azaltılması için yeni bir metot geliştirilmiştir. Bu metotta ülke genelindeki 161 tesisin üretimleri ayrı ayrı inceleyerek, hangi tesislerin devrede olması durumunda toplam tesis üretimlerindeki rampa olaylarının azaltılabileceği incelenmektedir. Bu araştırmayı gerçekleştirebilmek için GA yardımıyla, devrede en az 145 (%90), 113 (%70) ve 80 (%50) tesis olması durumları için 1, 3 ve 6 saatlik periyotlardaki rampa olaylarının minimum olduğu durumlar bulunmuştur. Bu aşamada GA kısıtlamalara bağlı olarak (tesis sayısı, değişim zaman aralıkları) ilk yapılan işlem en basit ifadelerle, rastgele tesisler çalıştırılıyor ve çalıştırılan tesislerin rampa olaylarını gösteren histogram grafik alanı hesaplanıyor. Bu hesaplama döngüsü, minimum histogram alanına sahip tesis kümesi bulunana kadar devam ediyor. Tüm bu işlemler Matlab ara yüzünde gerçekleştiriliyor.

#### 3.1. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

GA, doğada canlılar arasında görülen ve doğal seçim ilkesine dayanan bir optimizasyon yöntemidir[26], [27]. Bu yöntem, doğada görülen güçlü olan canlının hayatta kalması mantığına dayanmaktadır[28], [29]. Evrimsel süreçlerin sonunda hayatta kalabilen bireyler en güçlü canlılardır. Doğada görülen tüm bu evrimsel süreçler bilgisayar ortamında modellenerek GA'yı oluşturmaktadır. Bu yöntemin ilk temsilcisi, "Cellular Automata" ve "Doğal ve Yapay Sistemlerde Uyarılma" isimli kitapların sahibi John Holland olarak kabul edilmektedir[26]. GA, doğadaki evrim süreci taklit edilerek, çözümü zor problemlerin optimum veya optimuma yakın çözümleri elde edilmektedir[30], [31]. GA ile problemler çözümlenirken ilk olarak amaç fonksiyonu oluşturulmaktadır. Daha sonra probleme ait değişken parametreler kromozomlara kodlanır[32], [33]. Bu aşamaların sonunda karmaşık problemlerin çözümleri kolaylıkla gerçekleştirilebilir [34].

Yapılan çalışmadaki problemin genetik algoritma modellenmesi aşamasında her bir tesis üretimi bir geni, çalışmakta olan toplam tesisler ise bir bireyi ifade etmektedir. Optimizasyon işleminde rastgele tesislerin bulunduğu herhangi bir popülasyondan başlayarak nüfusun her bir bireyi tesis üretimlerinin rampa oranlarına ait histogram grafik alanını veren amaç fonksiyonuna göre değerlendirilmekte ve bu değerlendirmeye göre sonraki nesil oluşturulmaktadır. Değerlendirme aşamasında tesislerin rastgele seçiminden dolayı, en iyi çözüm evrimin ilk evresinde bile ortaya çıkabilmektedir. Bunun yanında, nüfusun tesis üretimlerinin rampa oranlarına ait histogram grafik alanının azalmasıyla beraber en iyi nüfus elde edilmektedir. Böylece tüm tesisler arasında, tesis üretim rampa oranları en küçük tesis kümesi elde edilmektedir. Tüm bu süreçlerin dâhil edildiği GA akış şeması Şekil 3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Genetik algoritma akış şeması

GA akış şemasında tesis üretim değişimleri incelenirken karar aşamasında aşağıdaki kısıtlar dikkate alınmıştır.

$$\begin{aligned}
 a_i &\in \{0,1\} \parallel \forall i = [1,161] & 1 \\
 0 &\leq b \parallel \forall b \in N & 2 \\
 a * x &\geq b & 3
 \end{aligned}$$

Bu kısıtlamalar Eşitlik 1’de,  $a$  tüm tesislerin çalışması durumunu, Eşitlik 2’de,  $b$  çalıştırılmak istenilen minimum tesis sayısını ve Eşitlik 3’te,  $x$  GA sonucunda elde edilen tesisleri ifade etmektedir. Yapılan çalışmada  $b$ ’nin 145, 113 ve 80 değerleri için çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu değerlere göre farklı zaman periyotlarında (1, 3 ve 6 saatlik) optimum çözümler elde edilmiştir.

### 3.1. Histogram Alanı Hesabı (Histogram Area Calculation)

GA’da çözümü gerçekleştirilen fonksiyonun histogram grafik alanını hesaplamayabilmek için yamuk kuralı kullanılmıştır. Yamuk kuralı, matematik alanında kullanılan sayısal bir entegrasyon yöntemidir[35]. Bu yöntem, fonksiyon ile x-ekseni arasında kalan alanı daha kolay hesaplanabilir yamuk alanlarına bölerek, entegrasyona bir aralıkta yaklaşmaktadır. Yani herhangi bir  $f(x)$  fonksiyonu ile x-ekseni arasında kalan alanın, yamuk alanlarına bölünerek yakınsama metoduyla hesaplanmasıdır [36]. Bu kuralın matematiksel denklemleri Eşitlik 4 ve Eşitlik 5’te verilmiştir.

$$\int_a^b f(x) dx \tag{4}$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2} \{f(a) + f(b)\} \tag{5}$$

Eşitlik 4’te yer alan  $a$  ve  $b$  değerleri  $f(x)$  fonksiyonun integral alan sınırlarıdır.  $a$  ve  $b$  değerlerine ait sınırlandırma Eşitlik 6’da ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca parçalara ayrılan her bir yamuğun taban uzunluğu  $\Delta x_i$  ile ifade edilmektedir ve Eşitlik 7’de gösterilmiştir.

$$[a, b] = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N-1} < x_N = b\} \quad 6$$

$$\Delta_{x_i} = x_i - x_{i-1} \quad 7$$

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^N \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2} \Delta_{x_i} \quad 8$$

$$= \frac{\Delta_{x_i}}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{N-1}) + f(x_N))$$

Tüm bu denklemlerin birleştirilmesi ile elde edilen genel matematiksel denklem (Eşitlik 8) kullanılarak RES üretimlerinin değişimlerine ait histogram grafik alanları hesaplanmıştır.

#### 4. BULGULAR (FINDINGS)

Rampa (değişim) olayı, rüzgâr gücünün bir zamandan diğer zamana göre değişimini ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle iki zaman periyodu arasındaki güç değişimi rampa olarak tanımlanmaktadır. Saniye veya dakika gibi küçük zaman dilimlerinde meydana gelen büyük rampa olaylarının şebeke sistemi üzerinde çok fazla olumsuz etkisi yoktur. Fakat bir saat ve üzerindeki zaman dilimlerinde meydana gelen büyük rampa olayları şebekenin işletilmesi açısından büyük zorluklar oluşturmaktadır. RES üretimlerinin sabit olması beklenmediğinden, bir veya birkaç saatlik değişimlerin istatistiksel özellikleri (ortalama, standart sapma, maksimum ve minimum değişimler), rüzgâr enerjisinin rampalama davranışlarının birinci dereceden göstergeleridir. Rampa olaylarındaki maksimum ve minimum değişimler sırasıyla, pozitif ve negatif olarak tanımlanmaktadır. Pozitif değişimler tesis üretiminin önceki zamana göre arttığını, negatif değişim ise üretimin önceki zamana göre azaldığını ifade etmektedir.

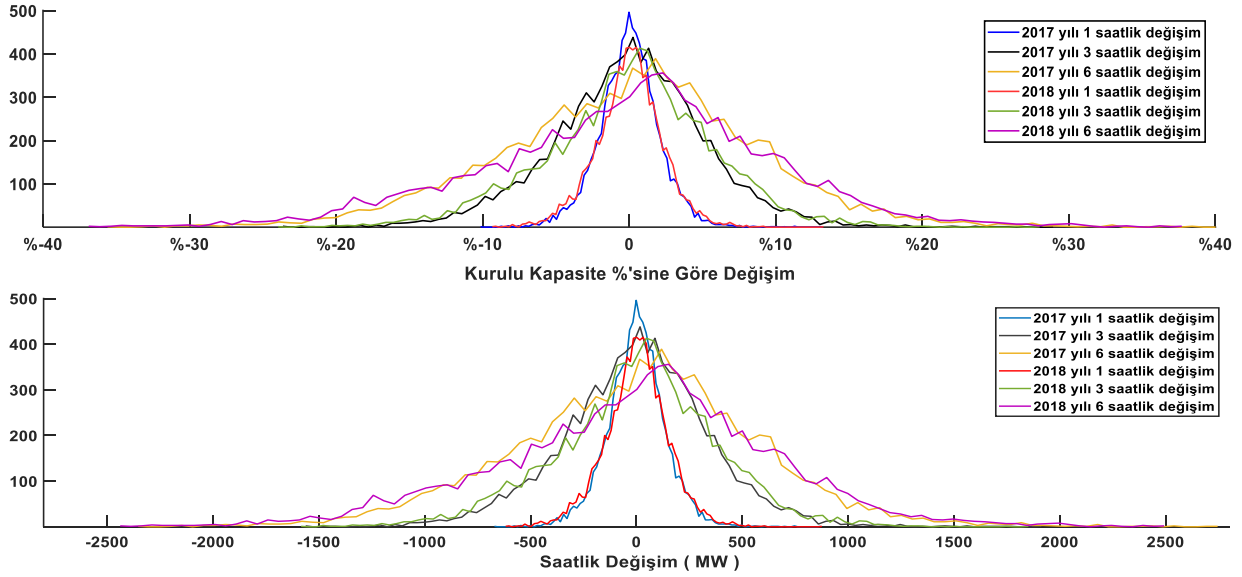
Çalışmada kullanılan Türkiye geneli RES üretimlerinin istatistiksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda, 2017 ve 2018 yıllarına ait 161 tesisin saatlik ortalama üretimlerindeki rampa olaylarının; ortalaması, standart sapması ve maksimum-minimum büyüklükleri verilmiştir. Tesis üretimlerine ait rampaların ortalamalarının hesaplanması aşamasında ilk olarak rampaların büyüklükleri belirlenmiştir. Daha sonra rampa büyüklüklerinin mutlak değeri alınarak, oluşan rampaların ortalamaları hesaplanmıştır. Tesis üretimlerine ait standart sapma hesaplamalarında da aynı yöntem kullanılarak ilk olarak rampalar hesaplanmış ve bu değerlerin mutlak değerleri alınmıştır. Mutlak değeri alınan rampanın standart sapması ( $\alpha$ ) hesaplanmıştır. Tesis üretimlerine ait maksimum yükselme ve düşmeler ise farklı zaman periyotlarındaki üretim farkları alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca tesis üretimlerinde görülen rampa büyüklüklerinin ortalama, standart sapma ve maksimum değerleri toplam kapasiteye bölünerek elde edilen yüzdesel oranları Tablo 2’de verilmiştir. Bu yüzdesel oranlar sayesinde RES üretimlerinde meydana gelen rampa olaylarının büyüklükleri daha net görülmektedir. RES üretimlerinde meydana gelen rampa olayları 2017 ve 2018 yılları için değerlendirildiğinde, 2018 yılındaki rampa RES üretimlerinde görülen rampa olaylarının ortalamaları ve standart sapmalarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Tesis üretimlerine ait rampa olayları büyüklüklerine göre değerlendirildiğinde; tesis üretimlerinde en fazla artışın 2017 yılında, 6 saatlik zaman periyodunda, toplam kurulu gücün %41.91 büyüklüğünde gerçekleştiği görülmektedir. Tesis üretimlerindeki en fazla düşme ise 2018 yılında, 6 saatlik zaman periyodunda, toplam kurulu gücün %37.26 büyüklüğünde gerçekleştiği görülmektedir.

**Tablo 2.** RES saatlik değişim istatistikleri

	Ortalama		Standart Sapma		Maksimum (MW)					
	(MW)	Kapasite %	$\alpha$ (MW)	$3\alpha$ (MW)	Kapasite %	Yükselme	Kapasite %	Düşme	Kapasite %	
2017	1 saat	103.63	1.57	88.25	264.75	4.00	878.79	13.29	-678.36	10.26
	3 saat	266.41	4.03	223.72	671.16	10.15	1929.99	29.19	-1579.83	23.90
	6 saat	451.35	6.83	367.91	1103.73	16.69	2770.82	41.91	-2379.21	35.99
2018	1 saat	114.85	1.74	95.96	287.88	4.35	883.56	13.36	-624.91	9.45
	3 saat	293.53	4.44	245.17	735.51	11.12	1868.73	28.27	-1600.97	24.22
	6 saat	499.19	7.55	412.33	1236.99	18.71	2517.42	38.08	-2463.08	37.26



Tesis üretimlerindeki rampa olaylarının saatlik değişimlerini ve değişim yüzdelerinin histogram grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4). Bu grafikler sayesinde RES üretimlerindeki rampa olayları daha net görülmektedir.

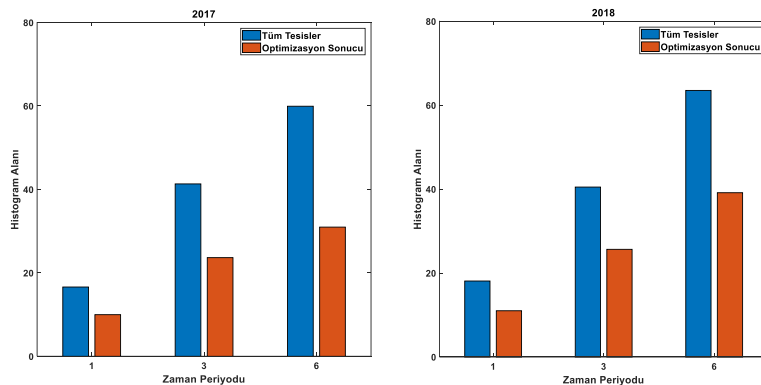


Şekil 4. Türkiye RES üretimlerinin kurulu kapasiteye göre değişim yüzdesi ve saatlik değişimler

Yapılan bu çalışmada GA ve histogram grafikleri kullanılarak Türkiye'deki RES tesislerinin %90, %70 ve %50'sinin çalışması durumları için toplam üretimdeki rampa olaylarının minimum olduğu tesis kümeleri belirlenmiştir. Elde edilen tesislerin illere göre dağılımları Ek 1'de verilmiştir. Elde edilen çözümlerin 1, 3 ve 6 saatlik rampa olaylarının histogram alanının büyüklüğü Tablo 3'de verilmiştir. Çözümler ve mevcut tesis durumlarındaki rampa büyüklüklerinin daha net görülmesi amacıyla 2017 ve 2018 yıllarındaki, tüm tesis kümesine (%100) ve en iyi tesis kümesine (%50) ait rampa büyüklükleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde verilen mavi sütunlar, tüm tesislerin devrede olması durumundaki rampa olaylarının histogram grafiklerinin altında kalan alanları göstermektedir. Kırmızı kutu grafikler ise tesislerin %50'sinin devrede olması durumundaki rampa olaylarının histogram grafiklerinin altında kalan alanları göstermektedir.

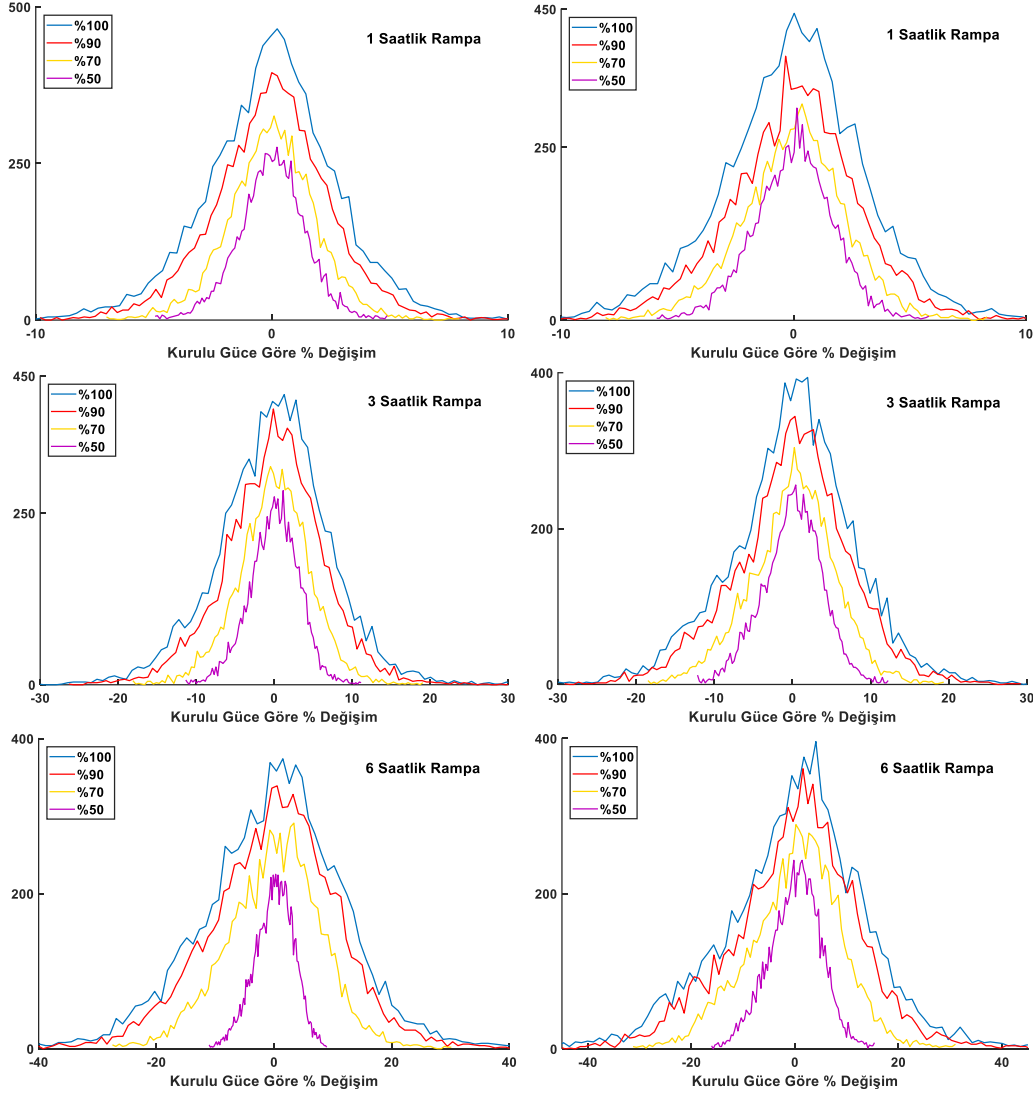
Tablo 3. Histogram grafiğinin altında kalan alanlar

	2017				2018			
	%100	%90	%70	%50	%100	%90	%70	%50
1 saat	16.61	14.11	11.49	9.98	18.10	14.40	12.40	11.01
3 saat	41.32	35.97	29.08	23.65	40.49	35.59	29.34	25.65
6 saat	59.94	54.53	45.04	30.97	63.52	57.69	48.70	39.14



Şekil 5. 2017 ve 2018 yıllarındaki tüm tesis kümesine (%100) ve en iyi tesis kümesine (%50) ait rampa büyüklüklerinin histogram alanları

Ayrıca 2017 ve 2018 yılları için elde edilen optimum çözümlerdeki 1, 3 ve 6 saatlik rampa değerlerinin histogram grafikleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Şeklin sol tarafında 2017 ve sağ tarafında 2018 yıllarına ait 1, 3, 6 saatlik rampa değerlerinin verilmiştir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada ilk olarak RES üretimlerindeki rampa olayları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda 2017-2018 yıllarındaki tesis üretimlerinin 1, 3 ve 6 saatlik periyotlardaki üretim değişimlerinin; ortalamaları, standart sapmaları ve belirtilen zaman periyotlarındaki maksimum-minimum değişimler elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen bu sonuçlar aynı tabloda toplam kurulu tesis kapasitesine göre değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde RES üretimlerinde en küçük %13.29, en büyük %41.91 artışlar ve en küçük %9.45, en büyük %37.26 azalışlar meydana geldiği görülmüştür. Tesis üretimlerine ilişkin rampa olaylarının daha net görülebilmesi için kurulu kapasite yüzdesine göre ve saatlik değişimlere göre histogram grafikleri verilmiştir. RES üretimlerinde %40'lık bir değişimin görülmesi şebeke üzerinde çok büyük sorunlar teşkil etmektedir. Ayrıca ülkemizin mevcut RES potansiyelini değerlendirdiğimizde, RES üretimlerinin artmasıyla beraber, şebeke üzerindeki rampa olaylarının bozucu etkilerinin de artacağı öngörülmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla ülke genelindeki en iyi (kararlı) tesis RES üretimleri belirlenerek rampa olaylarının minimum yapılması durumları araştırılmıştır. Bu amaçla GA yardımıyla üretim değişimlerinin, tesislerin %90, %70 ve %50'sinin çalışması durumları için toplam üretim değişimleri en az olan tesislerin seçilmesi sağlanmıştır. Bu tesislere ait üretim değişimlerinin incelenmesi aşamasında, GA tarafından elde edilen tesislere ait üretim değişim histogram

grafiklerinin alanları hesaplanmış ve minimum alana sahip tesis kümesi optimum çözüm olarak belirlenmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- 2017 yılına ait 1 saatlik periyottaki histogram alanları değerlendirildiğinde 161 tesisin çalışması durumunda alan 16.61 iken, 80 tesisinin çalışması durumundaki alan ise 9.98 olarak bulunmuş ve rampa olaylarında %39.91'lik bir iyileşme olduğu görülmüştür.
- 2017 yılının 6 saatlik periyottaki histogram alanlarını değerlendirdiğimizde 161 tesisin çalışması durumundaki alan 59.94 iken, 80 tesisin çalışması durumundaki alan 30.97 olarak bulunmuştur ve mevcut rampa olaylarında %48.33'lik bir iyileşme olduğu görülmüştür.
- 2018 yılındaki rampa olaylarını değerlendirdiğimizde 1 saatlik periyottaki 161 tesisin çalışması durumunda alan 18.10 iken, 80 tesisin çalışması durumunda alan 11.01 olarak elde edilmiştir. Bu durum da GA tarafından belirlenen tesislerin çalıştırılması ile rampa olaylarında %39.17'lik azalma olacağı sonucuna ulaşılmıştır.
- 2018 yılının 6 saatlik periyottaki 161 ve 80 tesisin çalışması durumundaki alanlar sırasıyla 63.52 ve 39.14 olarak bulunmuştur. 2018 yılındaki 6 saatlik periyottaki 80 tesisin çalışması durumunda mevcut rampa olayların da (161 tesis çalışması durumunda ) %38.38'lik bir azalma olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu sonuçlar neticesinde bazı bölgelerde üretim yapan tesis kümelerinin, toplam üretimlerinin daha düşük rampa olaylarına sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada önerilen GA temelli yöntem ile elde edilen tesis lokasyonları dikkate alınarak şebekedeki RES kurulu güç artışı yapılması durumunda toplamda rampa olaylarının minimum olacağı öngörülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (*Proje No: 2019/4-20 D*) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca; TEİAŞ Genel Müdürlüğü, Yük Tevzi Dairesi, İşletme Koordinasyon Müdürü, Alp Albostan'a çalışmamıza yaptıkları katkılardan dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Turkish Wind Energy Association, "Turkish Wind Energy Statistic Report July 2019," pp. 6–7, 2019.
- [2] A. Kerem, Y. Atayeter, S. Görgülü, and S. Salman, "Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İstiklal Yerleşkesi'nin Rüzgar Enerji Fizibilite Alt Yapısının Hazırlanması ve Uygulanması," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 18-24–24, 2014.
- [3] K. Doğanşahin, A. F. Uslu, and B. Kekezoğlu, "İki Bileşenli Weibull Dağılımı ile Rüzgâr Hızı Olasılık Dağılımlarının Modellenmesi," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 15, pp. 315–326, 2019.
- [4] S. Mishra, M. Leinakse, and I. Palu, "Wind power variation identification using ramping behavior analysis," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 565–571, 2017.
- [5] C. Yildiz and M. Şekkelı, "Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında rüzgar enerjisi ve pompaj depolamalı hidroelektrik santral için optimum teklif oluşturulması Optimal bidding in Turkey day ahead electricity market for wind energy and pumped storage hydro power plant," *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, vol. 22, no. 5, pp. 361–366, 2016.
- [6] S. Erkurt, "Şebeke bağlantılı fotovoltaik elektrik üretim sistemlerinin güç kalitesine etkileri ve performans analizi," 2015.

- [7] M. Abuella and B. Chowdhury, "Forecasting of solar power ramp events: A post-processing approach," *Renew. Energy*, pp. 1380–1392, 2019.
- [8] S. Malkawi, M. Al-Nimr, and D. Azizi, "A multi-criteria optimization analysis for Jordan's energy mix," *Energy*, vol. 127, no. 13, pp. 680–696, 2017.
- [9] C. Viviescas *et al.*, "Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, no. May, 2019.
- [10] O. Aslantürk and G. Kıprızlı, "The role of renewable energy in ensuring energy security of supply and reducing energy-related import," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 2, pp. 354–359, 2020.
- [11] R. Sevlian and R. Rajagopal, "Wind power ramps: Detection and statistics," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2012.
- [12] Y. Wan, "Analysis of Wind Power Ramping Behavior in ERCOT," *Contract*, no. March, 2011.
- [13] E. Ela and J. Kemper, "Wind Plant Ramping Behavior," *Contract*, no. December, 2009.
- [14] V. Femin, R. Veena, I. Petra, S. Mathew, and J. Hazra, "Modelling the ramping behaviour of wind turbines," in *Proceedings of the 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy, ICUE 2016*, 2016.
- [15] İ. Karadöl, C. Yıldız, H. Açıköz, and M. Şekkeli, "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Sürekliliği Sağlamak için Optimum Enerji Karışımının Belirlenmesi : Kahramanmaraş Bölgesinde Bir Uygulama," vol. 35, no. March, pp. 173–182, 2020.
- [16] R. Sevlian and R. Rajagopal, "Detection and statistics of wind power ramps," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3610–3620, 2013.
- [17] A. Florita, B. M. Hodge, and K. Orwig, "Identifying wind and solar ramping events," *IEEE Green Technol. Conf.*, pp. 147–152, 2013.
- [18] J. Zhao, S. Abedi, M. He, P. Du, S. Sharma, and B. Blevins, "Quantifying Risk of Wind Power Ramps in ERCOT," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4970–4971, 2017.
- [19] A. Couto, P. Costa, L. Rodrigues, V. V. Lopes, and A. Estanqueiro, "Impact of Weather Regimes on the Wind Power Ramp Forecast in Portugal," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 934–942, 2015.
- [20] C. Gallego, Á. Cuerva, and A. Costa, "Detecting and characterising ramp events in wind power time series," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 555, no. 1, 2014.
- [21] A. M. Foley, P. G. Leahy, A. Marvuglia, and E. J. McKeogh, "Current methods and advances in forecasting of wind power generation," *Renew. Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 1–8, 2012.
- [22] M. Y. Hwang, C. H. Jin, Y. K. Lee, K. D. Kim, J. H. Shin, and K. H. Ryu, "Prediction of wind power generation and power ramp rate with time series analysis," *Proc. 2011 3rd Int. Conf. Aware. Sci. Technol. iCAST 2011*, pp. 512–515, 2011.
- [23] H. Zheng and A. Kusiak, "Prediction of wind farm power ramp rates: A data-mining approach," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 131, no. 3, pp. 0310111–0310118, 2009.
- [24] H. Zareipour, D. Huang, and W. Rosehart, "Wind power ramp events classification and forecasting: A data mining approach," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–3, 2011.
- [25] T. Ouyang, X. Zha, and L. Qin, "A Survey of Wind Power Ramp Forecasting," *Energy Power Eng.*, vol. 05, no. 04, pp. 368–372, 2013.

- [26] A. Altay, *Genetik Algoritma ve Bir Uygulama*. 2007.
- [27] G. G. Emel and Ç. Taşkın, “Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları,” *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi*, vol. 21, no. 1, pp. 129–152, 2002.
- [28] İ. Çelik, C. Yıldız, and M. Şekkeli, “Rüzgâr Enerji Santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 6, no. 4, pp. 1–1, 2018.
- [29] H. Zhi and S. Liu, “Face recognition based on genetic algorithm,” *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 58, pp. 495–502, 2019.
- [30] Y. İnceyol, *Arazi Düzenleme Çalışmalarında Genetik Algoritma Uygulaması*, vol. 85, no. 1. 2014.
- [31] V. Yigit, “Genetik Algoritma ile Türkiye Net Elektrik Enerjisi Tüketiminin 2020 Yılına Kadar Tahmini,” vol. 3, no. 2, pp. 3–7, 2011.
- [32] C. Ozturk, E. Hancer, and D. Karaboga, “A novel binary artificial bee colony algorithm based on genetic operators,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 297, pp. 154–170, 2015.
- [33] C. Jatoth, G. R. Gangadharan, and R. Buyya, “Optimal Fitness Aware Cloud Service Composition using an Adaptive Genotypes Evolution based Genetic Algorithm,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 94, pp. 185–198, 2019.
- [34] Ö. İşçi and S. Korukuglu, “Genetik Algoritma Yaklaşımı ve Yöneylem Araştırmasında Bir Uygulama,” *Yönetim ve Ekon. Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, vol. 10, no. 2, pp. 191–208, 2003.
- [35] S. Rules, “Area under a Curve : Trapezoidal and Simpson ’ s Rules Simpson ’ s rule is a method for evaluating the area under a curve from values of,” no. X, pp. 77–81, 1987.
- [36] K. C. Yeh and K. C. Kwan, “A comparison of numerical integrating algorithms by trapezoidal, Lagrange, and spline approximation,” *J. Pharmacokinet. Biopharm.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–98, 1978.

## Ek 1

Tesis Bulunan İller ve Toplam Kurulu Güçleri		2017									2018								
		1			3			6			1			3			6		
		90%	70%	50%	90%	70%	50%	90%	70%	50%	90%	70%	50%	90%	70%	50%	90%	70%	50%
<b>Adıyaman</b>	<b>25,003</b>	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Afyon</b>	<b>199,798</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,864	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Amasya</b>	<b>117,000</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,359	1,000	1,000	0,359	1,000	1,000	0,641
<b>Aydın</b>	<b>228,598</b>	1,000	1,000	0,606	1,000	1,000	0,862	1,000	1,000	0,716	1,000	0,652	0,514	1,000	0,803	0,565	1,000	0,626	0,652
<b>Balıkesir</b>	<b>1050,303</b>	0,990	0,414	0,109	0,678	0,445	0,154	0,644	0,503	0,196	1,000	0,552	0,218	0,789	0,567	0,333	0,921	0,578	0,120
<b>Bilecik</b>	<b>39,000</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000
<b>Bursa</b>	<b>119,400</b>	0,766	0,272	0,000	0,766	0,272	0,272	0,766	0,075	0,000	0,581	0,234	0,419	0,766	0,494	0,075	0,925	0,419	0,000
<b>Çanakkale</b>	<b>353,306</b>	0,788	0,644	0,858	0,830	0,903	0,382	1,000	0,472	0,297	1,000	0,779	0,356	0,672	0,654	0,207	0,858	0,593	0,752
<b>Edirne</b>	<b>130,996</b>	0,977	1,000	0,481	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,481	1,000	1,000	0,634	0,634	0,847	0,847	1,000	1,000	0,389
<b>Gaziantep</b>	<b>63,000</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Hatay</b>	<b>338,100</b>	0,831	0,710	0,920	1,000	1,000	0,613	1,000	1,000	0,831	1,000	1,000	0,831	1,000	0,775	0,642	1,000	1,000	0,947
<b>Isparta</b>	<b>60,000</b>	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>İstanbul</b>	<b>220,550</b>	0,973	0,385	0,467	1,000	0,358	0,249	1,000	0,348	0,204	1,000	0,973	0,576	0,796	0,602	0,557	0,973	1,000	0,865
<b>İzmir</b>	<b>1253,505</b>	0,932	0,545	0,457	0,892	0,449	0,244	0,861	0,518	0,268	0,730	0,640	0,295	0,881	0,569	0,323	0,845	0,600	0,328
<b>K.Maraş</b>	<b>27,500</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Karaman</b>	<b>6,999</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
<b>Kayseri</b>	<b>264,000</b>	1,000	0,955	0,955	1,000	0,955	0,642	1,000	1,000	0,557	1,000	0,688	0,688	1,000	1,000	0,784	0,727	0,830	0,830
<b>Kırklareli</b>	<b>116,200</b>	0,871	0,639	0,398	1,000	0,835	0,165	1,000	0,835	0,835	0,835	1,000	1,000	1,000	0,871	0,835	1,000	1,000	0,706
<b>Kırşehir</b>	<b>168,000</b>	1,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000
<b>Kocaeli</b>	<b>10,000</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Manisa</b>	<b>643,230</b>	0,894	0,380	0,000	0,953	0,823	0,606	0,549	0,752	0,132	0,580	0,263	0,468	1,000	0,362	0,158	0,937	0,532	0,373
<b>Mersin</b>	<b>176,000</b>	1,000	1,000	0,778	1,000	0,710	0,511	1,000	1,000	0,426	0,949	0,795	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,710
<b>Muğla</b>	<b>176,800</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,695	0,765	1,000	0,459	0,233	1,000	0,701	0,459
<b>Osmaniye</b>	<b>258,300</b>	0,806	1,000	1,000	1,000	0,806	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,716	1,000	1,000	0,477	1,000	1,000	0,806
<b>Sivas</b>	<b>150,000</b>	1,000	1,000	0,080	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,920	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Tekirdağ</b>	<b>149,300</b>	0,705	1,000	0,402	0,920	0,807	0,700	0,595	0,893	0,322	1,000	0,807	0,432	1,000	1,000	0,705	1,000	0,705	0,595
<b>Tokat</b>	<b>127,798</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	0,765	1,000	1,000	0,765	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,900	1,000	1,000	1,000
<b>Uşak</b>	<b>54,000</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Yalova</b>	<b>84,450</b>	1,000	0,361	0,361	1,000	1,000	0,000	0,639	1,000	0,361	1,000	0,639	0,000	1,000	0,361	0,361	1,000	0,361	0,000

## Improving the surface properties of Al 6013 and MS 58 materials by ball burnishing process for hole

 Harun KOÇAK 

Gazi University TUSAŞ-Kazan Vocational School, Department of Aircraft Technology, 06980, Kahramankazan/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 04/11/2020  
 Revision: 22/11/2020  
 Accepted: 22/11/2020

#### Highlights

- Surface quality
- Plastic deformation
- Micro hardness

#### Keywords

Ball burnishing  
 Al 6013  
 MS 58  
 Surface roughness

In this study, ball burnishing processes of the holes drilled in Al 6013 and MS 58 materials were investigated. In the tests, three different deformation portion (0.03-0.06-0.09) were left for both materials. After ball burnishing process, the samples were examined for surface roughness, micro hardness and microstructure.



**Figure A.** Ball burnishing process and surface roughness measurement

**Purpose:** In this study, it is aimed to improve the surface properties of the holes drilled in Al 6013 and MS 58 materials. For this, the ball burnishing process was applied to the inside of the hole. Thanks to this method, besides improving the surface properties, increasing the surface hardness is another purpose.

**Theory and Methods:** After drilling, the hole enlargement process was applied to the samples. Hole sizes were obtained in three different diameters ( $\varnothing$  a: 7.86-7.80-7.74 mm) depending on the ball diameter used in process. Ball made of bearing steel with a diameter of 7.92 mm was used in the ball burnishing process. The process was done on a lathe to forward the ball linearly along the hole axis. The inside of the hole is oiled to minimize friction and facilitate plastic deformation. Ball burnishing process was applied to the holes. The roughness of the hole surfaces was measured after the specimens were cut. Average surface roughness value was found by measuring from three different regions. After the sanding and polishing process was applied to the samples, microstructure images were taken and micro hardness measurement was made.

**Results:** Thanks to the ball burnishing process applied to the Al 6013 material, the surface roughness value (in the sample A1 with 0.03mm deformation portion) decreased from 1.42  $\mu\text{m}$  to 0.12  $\mu\text{m}$ . It was observed that the surface roughness value of 1.65  $\mu\text{m}$  measured before the process decreased to 0.17  $\mu\text{m}$  in the MS 58 sample. It has been determined that the micro hardness of the Al 6013 material is 129 HV and the hardness increases to 142 HV in the area close to the hole surface. It was observed that the hardness of MS 58 material, which was 150 HV at a distance of 300  $\mu\text{m}$ , was 180 HV in the region close to the hole surface.

**Conclusion:** It has been determined that the roughness of the hole surfaces is considerably reduced by ball burnishing process and polishing the holes in both materials. Thanks to this process, the surface roughness of the Al 6013 material decreased by 91.5% and for the MS 58 material by 89.6%. In the zone where plastic deformation occurred, 10% hardness increase was achieved for Al 6013 material and 20% hardness increase was achieved for MS 58 material. Considering the grain structure and hardness increase relationship, it has been found that the small grain structure enables higher surface hardness to be obtained.



## Al 6013 ve MS 58 malzemelere delik içi ezerek parlatma işlemi uygulanmasıyla yüzeysel özelliklerin iyileştirilmesi

Harun KOÇAK

Gazi Üniversitesi TUSAŞ-Kazan Meslek Yüksekokulu Uçak Teknolojisi Bölümü, 06980, Kahramankazan/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, Al 6013 ve MS 58 malzemelere delinen deliklerin ezerek parlatma işlemleri araştırılmıştır. Testlerde her iki malzeme için üç farklı ezme payı bırakılarak işlem yapılmıştır. Ezerek parlatma işleminin ardından numuneler, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve mikro yapı bakımından incelenmiştir. İşlem sonrasında Al 6013 malzemenin yüzey pürüzlülüğü % 91,5 ve MS 58 malzemenin yüzey pürüzlülüğü % 89,6 oranında azaldığı belirlenmiştir. Testlerde, elde edilen en iyi yüzey pürüzlülüğü değeri Al 6013 malzemede 0,12 µm olduğu belirlenmiştir. MS 58 malzemenin ezilmiş bölgesinde plastik deformasyonla birlikte % 20 sertlik artışı sağlanmıştır. Tane yapısı ve sertlik artışı birlikte düşünüldüğünde MS 58 malzemenin küçük tane yapısına sahip olmasından dolayı bu malzemenin yüzey sertliğinde daha fazla artış meydana geldiği belirlenmiştir.

### Improving the surface properties of Al 6013 and MS 58 materials by ball burnishing process for hole

#### Abstract

In this study, the ball burnishing processes of the holes drilled in Al 6013 and MS 58 materials were investigated. In the tests, three different portions (0,03-0,06-0,09 mm) for deformation were left for both materials. After burnishing process, the samples were examined for surface roughness, micro hardness and microstructure. It was determined that the surface roughness of the Al 6013 material decreased by 91.5% and the surface roughness of MS 58 by 89.6% after the process. In the tests, best surface roughness value obtained was 1.13 µm at Al 6013 material. The hardness increase occurring with plastic deformation in MS 58 material is 20%. Considering the grain structure and the hardness increase together, it was determined that the surface hardness of MS 58 material increased more because of the small grain structure of this material.

#### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 04/11/2020*  
*Düzeltilme: 22/11/2020*  
*Kabul: 22/11/2020*

#### Anahtar Kelimeler

*Bilyeli parlatma*  
*Al 6013*  
*MS 58*  
*Yüzey pürüzlülüğü*

#### Keywords

*Ball burnishing*  
*Al 6013*  
*MS 58*  
*Surface roughness*

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat işlemleri birçok endüstriyel üretim alanında kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sürecinde malzemeler, önce kaba işlemeden geçirilerek şekillendirilir. Daha sonra uygun kesici takım yardımıyla bitirme işlemleri uygulanarak parçanın yüzey kalitesi iyileştirilir. Bu yöntemle üretilen parçaların yüzey kalitesinin iyi olması aşınma direnci ve yorulma bakımından önemlidir [1,2]. Talaşlı imalat işlemleri arasında en sık kullanılan işlem delik delmedir. Yaklaşık olarak talaşlı imalat işlemlerinin %40 - %60'ını oluşturmaktadır [3]. Delik delme işleminde ise en önemli çıktılardan biri deliğin yüzey kalitesidir [4]. Ancak delik delme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü diğer talaşlı imalat işlemlerinden daha fazladır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi delme esnasında talaşın, delik içerisinden hızlı bir şekilde uzaklaştırılmamasıdır [5]. Bunun sonucunda talaş, delik içerisinde yüzeye çok fazla sürtünerek çıktığı için yüzey pürüzlülüğü kötüleşmektedir. Bu nedenle delik yüzeyini daha pürüzsüz hale getirmek için delme işlemi sonrası raybalama, honlama, taşlama ve ezerek parlatma gibi yöntemler uygulanmaktadır [6]. Bu işlemler içerisinde ezerek parlatma yöntemi hem yüzey pürüzlülüğünün azaltılması hem de delik yüzeyinin daha sert ve aşınma direncinin yükseltilmesi bakımından diğer yöntemlerden daha avantajlıdır [7-9]. Ezerek parlatma işleminde, silindirik veya küresel bilye gibi pürüzsüz sert bir takımla parça yüzeyine baskı



uygulanmakta ve yüzeyde plastik deformasyon oluşturulmaktadır. Bu sayede işlenmiş yüzeydeki çıkıntılar ezilmekte ve girintiler de dışa doğru çıkmaktadır [10]. Böylece parça yüzeyi daha pürüzsüz hale gelirken yüzeyde deformasyon oluşmakta ve malzemenin yüzey sertliğinin artmasıyla birlikte aşınma ve yorulma direnci de iyileşmektedir [11,12 ].

Ezerek parlatma işlemi için yapılan araştırmalar incelendiğinde genellikle Al alaşımları [13,14], çelik [15,16], pirinç [17], titanyum, nikel, bakır ve polimer malzemeler üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmüştür[8]. Yapılan araştırmalarda en çok araştırılan konu yüzey pürüzlülüğü değişimidir [8,18]. Ayrıca ezerek parlatma işlemine parametrelerin etkisi [19,20], yüzeye yakın bölgelerde ortaya çıkan sertlik değişimi [9,21], mikro yapıdaki değişimler [22] ve kalıntı gerilme oluşumu [23] incelenmiştir. Bununla birlikte genellikle silindirik parçalar üzerinde çalışıldığı delik içi parlatma konusunda daha az çalışma olduğu görülmüştür. Delik için yapılan ezerek parlatma işlemlerinde ise genellikle büyük çaplı delikler üzerinde çalışılmıştır.

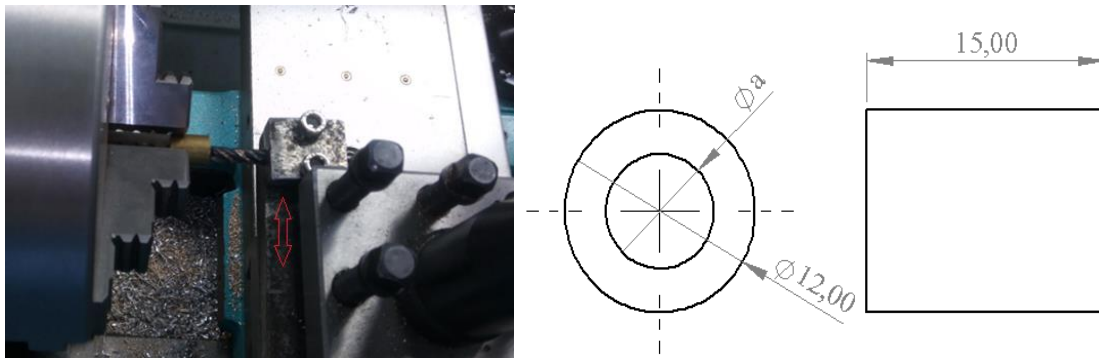
Bu çalışmada, Al 6013 ve MS 58 malzemelere delinen deliklerin ( $\text{Ø} < 8\text{mm}$ ) bilye yardımıyla ezerek parlatma işlemleri araştırılmıştır. Testlerde her iki malzeme için üç farklı ezme payı bırakılarak işlem yapılmıştır. Ezme işleminin ardından numuneler, yüzey pürüzlülüğü, mikro setlik ve mikro yapı bakımından incelenmiştir.

## 2. MALZEME ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada MS 58 pirinç ve Al 6013 malzemeler kullanılmıştır. Malzemelere ait kimyasal bileşim Tablo 1’de verilmiştir. Silindirik malzemeler ( $\text{Ø}12 \times 15\text{ mm}$ ) torna tezgahında işlenmiş ve sonrasında  $\text{Ø}7$  matkapla delinmiştir. Delme işlemi sonrası Şekil 1’de görüldüğü gibi torna katerine bağlanan parmak freze çakısıyla numunelere delik büyütme işlemi uygulanmış ve kullanılan bilye çapına ( $\text{Ø} 7,92$ ) bağlı olarak üç farklı çapta ( $\text{Ø} a : 7,86-7,80-7,74\text{ mm}$ ) delik ölçüleri elde edilmiştir. Delik büyütme işleminden sonra talaş kalıntıları temizlenmiştir.

**Tablo 1.** Malzemelerin kimyasal bileşimi

	Cu	Pb	Zn	Fe	Ni	Sn	Al			
MS58	58	2,4-2,6	kalan	0,4-0,6	0,5-0,6	0,4-0,5	0,1-0,2			
	Cu	Mg	Zn	Fe	Cr	Mn	Si	Ti	Al	
Al 6013	0,6-1,1	0,8-1,2	0,25	0,5	0,1	0,2-0,8	0,6-1	0,1	kalan	



**Şekil 1.** Numune boyutları ve delik büyütme işlemi

Ezerek parlatma işleminde çapı 7,92 mm olan rulman çeliğinden yapılmış bilye kullanılmıştır. Bilyeyi delik eksenine boyunca doğrusal olarak ilerletebilmek için işlem torna tezgahında yapılmıştır ( Şekil 2). Sürtünmeyi en aza indirmek ve plastik deformasyonu kolaylaştırmak için delik içerisi yağlanmıştır. İşlem, parça boyunun 10 mm uzunluğuna uygulanmıştır. İşlem şartları Tablo 2’de verilmiştir. Ezerek parlatma işleminin ardından numuneler kesildikten sonra ezme işlemi uygulanan ve uygulanmayan bölgenin yüzey

pürüzlülüğü ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde Mitutoyo SJ-210 pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Üç farklı bölgeden ölçüm yapılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri bulunmuştur.

**Tablo 2.** İşlem şartları

Malzeme	Ezme derinliği (mm, Yarıçapta)		
Al 6013-MS 58	0,03	0,06	0,09

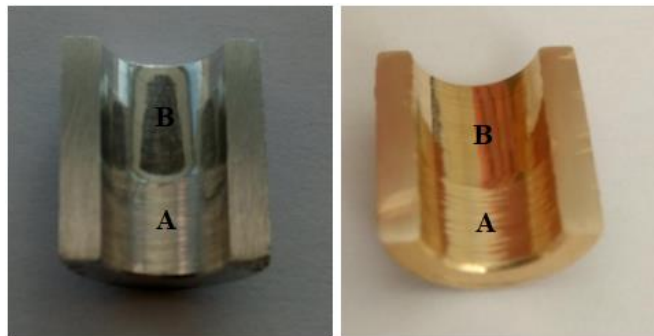


**Şekil 2.** Ezerek parlatma ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Mikro sertlik ölçümleri için numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Ölçümler HIGHWOOD HWMMT-X3 mikro sertlik cihazında 200 gr (1,96) yük altında kesit bölgesinde 0,05 mm aralıklarla dıştan içe doğru yapılmıştır. Ardından numuneler dağlanmış ve Leica marka optik mikroskopla mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Ezerek parlatma işleminden sonra numuneler kesilmiş ve yüzey pürüzlülüğü, mikro yapı ve mikro sertlik bakımından incelenmiştir. Şekil 3'te yer alan numuneler gözle incelendiğinde ezerek parlatma işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğünün çok daha iyileştiği (B bölgesi) görülmüştür. Ayrıca yapılan işlem nedeniyle istenilmeyen herhangi bir yüzey hasarı veya deformasyon yığılması oluşmadığı ve bu yöntem sayesinde bileyle küçük deliklerin daha pürüzsüz hale getirilebileceği tespit edilmiştir.



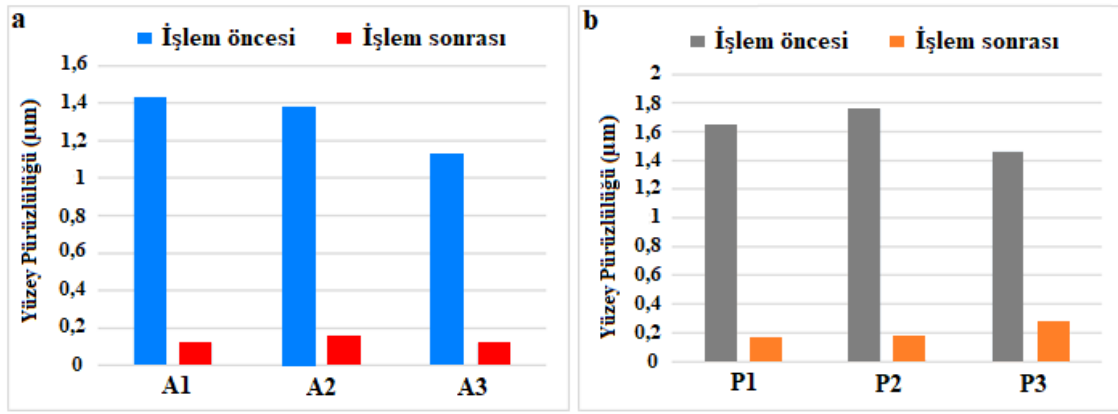
**Şekil 3.** İşlem sonrası numuneler (A2, P2)(A: İşlem görmemiş, B: İşlem görmüş)

#### 3.1. Yüzey pürüzlülüğü değişimi (Surface Roughness Change)

Ezme işlemi öncesinde numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçüldüğünde MS58 numunenin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 1,46  $\mu\text{m}$  - 1,76  $\mu\text{m}$  aralığında ve Al 6013 numunenin 1,13  $\mu\text{m}$  - 1,42 aralığında olduğu görülmüştür. Al 6013 malzemeye delme işlemi sonrasında ezerek parlatma işlemi yapıldığında 0,03 ezme payı bırakılan numunede(A1) yüzey pürüzlülüğü değeri 1,42  $\mu\text{m}$ 'den 0,12  $\mu\text{m}$  değerine düşmüştür. Yüzdesele olarak hesaplandığında ezerek parlatma işlemi sayesinde yüzey pürüzlülüğü değeri % 91,5 azalmıştır. MS 58 numunede(P1) ise işlem öncesi ölçülen 1,65  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü değeri % 89,6 oranında azalarak

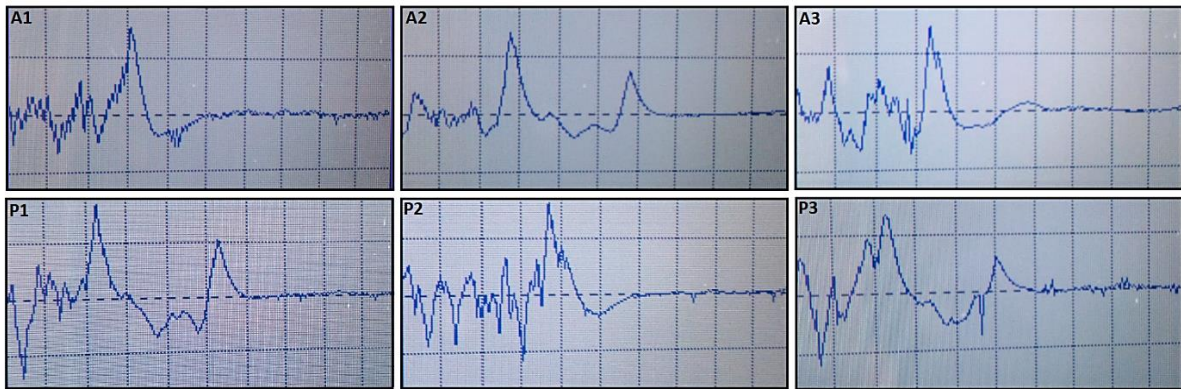
0,17  $\mu\text{m}$ 'a kadar düştüğü görülmüştür. Ezerek parlatma işlemi öncesinde ve sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişimi Şekil 4'te görülmektedir.

Talaşlı imalat sonrasında yüzey pürüzlülüğünün azaltılması önemli bir faktördür. Bunun için taşlama, honlama, yüksek hassas işleme ve ezerek parlatma işlemleri uygulanmaktadır [24]. Literatürde bu işlemler içerisinde hem yüzey pürüzlülüğünün azaltılması hem de yüzey sertliğinin artırılması bakımından ezerek parlatma işleminin daha uygun olduğu belirtilmektedir[25,26]. Tayeb ve diğerleri [27] Al 6061 malzemeye tornalama işlemi sonrasında ezerek parlatma işlemi uyguladıklarında elde ettikleri en iyi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 0,28  $\mu\text{m}$  olduğunu ve % 40 oranında iyileşme sağladıklarını belirtmektedirler. Axir ve diğerleri [28] Al 2014 malzemeye bilye ile delik içi ezerek parlatma işlemi uyguladıklarını ve başlangıçta 4  $\mu\text{m}$  civarında olan yüzey pürüzlülüğünün 0,14  $\mu\text{m}$  düştüğünü rapor etmişlerdir. Hassan ve diğerleri[29] pirinç malzemeye ezerek parlatma işlemini uygulamışlar ve yüzey pürüzlülüğünü 0,172  $\mu\text{m}$ 'a kadar düşürmüşlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında benzer olduğu görülmüştür. Numunelere 0,03-0,06-0,09 mm olmak üzere üç farklı ezme payı bırakılmış ve aynı şartlarda bilye ile ezerek parlatma işlemi uygulanmıştır. Farklı ezme payları için yüzey pürüzlülüğündeki değişimler (Şekil 4) incelendiğinde çok farklı sonuçların ortaya çıkmadığı görülmüştür.



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğü değişimi (a: Al 6013, b: MS58)

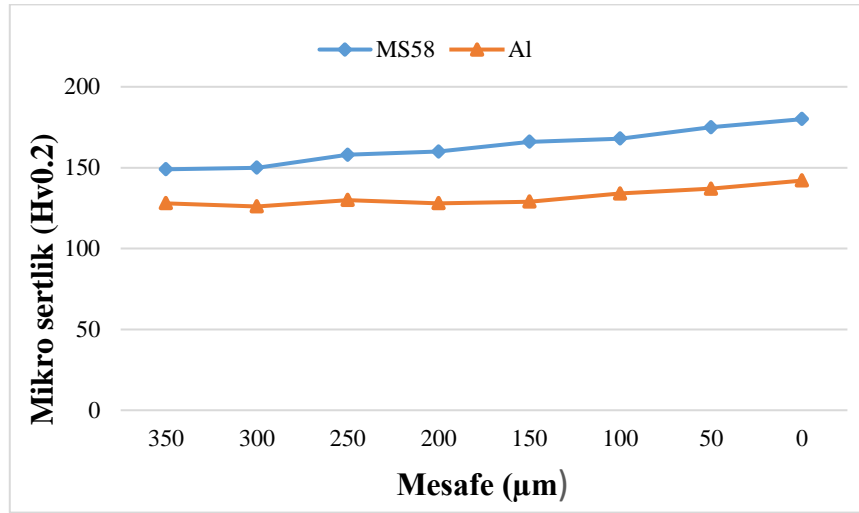
Yüzey pürüzlülüğü cihazından alınan yüzey pürüzlülüğü profili (Şekil 5) incelendiğinde ezerek parlatma işlemi uygulanmasıyla pürüzlülüğün ne kadar azaldığı anlaşılmaktadır. Delik yüzeylerinin pürüzsüz hale getirilmesi için genel olarak en çok tercih edilen işlemler taşlama (Ra 1.6-0.1  $\mu\text{m}$ ), raybalama (Ra 3.2-0.8  $\mu\text{m}$ ) ve honlamadır (Ra 0.8-0.1  $\mu\text{m}$ ). Elde edilen sonuçlar hem diğer uygulamalarla hem de literatürle karşılaştırıldığında bu çalışmada yapılan uygulamanın yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesinde uygun bir yöntem olduğu görülmüştür [30].



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğü profili

### 3.2. Ezerek Parlatmanın Mikro Sertliğe Etkisi (Effect of ball burnishing on Micro Hardness)

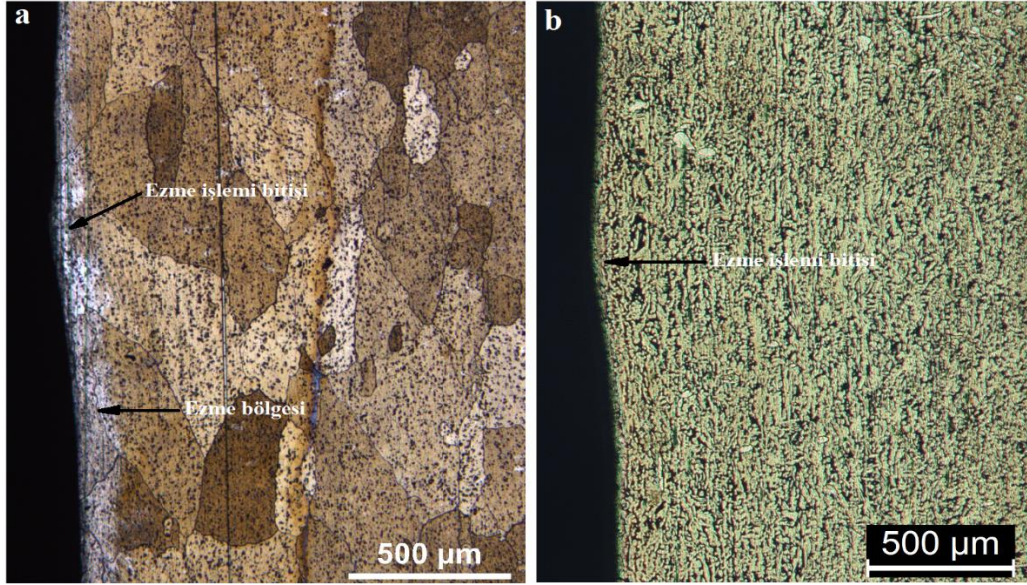
Diğer yüzey bitirme işlemlerine göre ezerek parlatma işleminin bir avantajı işlemlerle birlikte yüzey sertliğinin artırılmasıdır. Nu numunelere uygulanan ezerek parlatma işleminden sonra delik yüzeyinden dışa doğru mikro sertlik ölçülmüştür. Şekil 6'da verilen grafik incelendiğinde delik yüzeyinden 150  $\mu\text{m}$  mesafede Al 6013 malzemenin mikro sertliğinin 129 HV olduğu ve delik yüzeyine yakın bölgede sertliğin 142 HV'e çıktığı tespit edilmiştir. MS 58 malzemenin 300  $\mu\text{m}$  mesafede 150 HV olan sertliğinin delik yüzeyine yakın bölgede 180 HV olduğu görülmüştür. Al malzemede 150  $\mu\text{m}$  derinlikte sertlik değişimi meydana gelirken MS 58 malzemede 300  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar sertlik değişimi meydana gelmiştir. Ovalı ve Akkurt [31] ticari pirinç malzemeye delik içi ezerek parlatma işlemi uygulamışlar ve malzeme yüzeyinde 160 HV mikro sertlik elde ettiklerini belirtmişlerdir. Tayep ve diğerleri [27] Al 6061 malzemeye ezerek parlatma işlemi uyguladıklarında farklı işlem parametrelerine bağlı olarak 78-92 HRB(150-200 HV) mikro sertlik elde ettiklerini belirtmişlerdir. Egea ve diğerleri [32] Al 2050 malzemenin ezerek parlatma işleminden sonra yüzey sertliğinin %37,5 arttığını ve 140-160 HV mikro sertlik elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada Al 6013 malzeme için % 10 sertlik artışı ve MS 58 malzeme için % 20 sertlik artışı sağlanmıştır. İşlem sonrasında elde edilen mikro sertlik değerleri literatürdeki değerlere benzerdir.



Şekil 6. Ezerek parlatma işlemi sonrası mikro sertlik değişimi

### 3.3. İşlem Sonrası Mikro Yapı (Post-Processing Microstructure)

Ezerek parlatma işlemi sonrasında ezme işleminin bittiği bölgenin mikro yapısı Şekil 7'de görülmektedir. Mikro yapı görüntüleri incelendiğinde Al 6013 malzemenin tane yapısının MS 58 malzemeye göre daha büyük olduğu görülmüştür. Yapılan işlem sonrasında Al 6013 malzemenin tane yapısında belirgin bir değişim olmadığı ve parlatılıp dağlandıktan sonra ezilen bölgenin beyaz renkte görüldüğü belirlenmiştir. Malzemenin tane yapısının büyük olmasından dolayı değişim anlaşılabilir değildir ancak beyaz bölge, daha sert yapıda olmasından dolayı bu bölge dağlanmadığı düşünülmektedir. Dolayısıyla beyaz kısım sertleşen bölgeyi göstermektedir. MS 58 malzemenin tane yapısı incelendiğinde daha küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca MS 58 malzemede sertlik artışı daha fazladır. Tane yapısı ve sertlik artışı birlikte düşünüldüğünde küçük tane yapısı daha yüksek yüzey sertliğinin elde edilmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 7. Numunelerin mikro yapısı

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Ezerek parlatma işlemi sonrasında elde edilen en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri MS 58 malzemede  $1,46 \mu\text{m}$  ve Al 6013 malzemede  $1,13 \mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir. Al 6013 malzeme için yüzey pürüzlülüğü % 91,5 ve MS 58 malzeme için % 89,6 oranında azalmıştır. Farklı ezme paylarıyla yapılan işlemlerde elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Plastik deformasyonun olduğu ezme bölgesinde Al 6013 malzeme için % 10 sertlik artışı ve MS 58 malzeme için % 20 sertlik artışı sağlanmıştır. Tane yapısı ve sertlik artışı birlikte düşünüldüğünde küçük tane yapısı daha yüksek yüzey sertliğinin elde edilmesine imkan sağlamaktadır.




#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hassan, A. M., & Al-Bsharat, A. S. (1996). Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals. *Wear*, 199(1), 1-8.
- [2] Abd AL-Wahhab, O. M., The Effects of Roller-Burnishing on Some Properties of Non-Ferrous Metals. *M. Sc. Thesis*. Jordan University of Science and Technology. (1996).
- [3] Shokrani, A., Huibin, S., Dhokia, V. & Newman, S.T. High speed cryogenic drilling of grade 5 titanium alloy, 26th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Seoul, Republic of Korea, (2016).
- [4] Bilgin, M. "AZ31B magnezyum alaşımının sürtünmeli delme işlemi üzerine deneysel çalışma." *Politeknik Dergisi*: 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.762945>
- [5] Bayraktar Ş., Siyambaş Y., and Turgut Y., Delik delme prosesi: bir araştırma. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21.2, 120-130 (2017).
- [6] Akkurt A., Kurt A, Özdemir A., Şeker U. Comparison of Hole Surface Finishing Processes with Roller Burnishing Method Applied in Copper Materials *Gazi University Journal of Science GU J Sci* 27(1):721-734 (2014)

- [7] Akkurt A., Ovalı İ. Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum Alaşımı Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15,3, 371-382, 2009
- [8] Mahajan D., Tajane R., A Review on Ball Burnishing Process, International Journal of Scientific and Research Publications, 3, 4, 2013
- [9] Basak H. and Goktas H.H., "Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic", Materials and Design ,Vol. 30 pp.1275–1281. (2009),
- [10] Ökmen H., Er Ü., Ti6Al4V Alaşımında Esnek Honlama ve Silindirik Parlatma İşlemlerinin Delik Yüzey Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, ESOGÜ Müh Mim Fak Derg., 28(2), 128-135, 2020.
- [11] Akkurt A., Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel. Journal of Materials Engineering and Performance, 20, 960- 968, (2011).
- [12] Zhao, J. & Liu, Z., Investigations of ultrasonic frequency effects on surface deformation in rotary ultrasonic roller burnishing Ti-6Al-4V. Materials and Design, 107, 238-249, (2016).
- [13] J. Naga Malleswara Rao, A. Chenna Kesava Reddy and P.V. Rama Rao, "Design and fabrication of new type of dynamometer to measure radial component of cutting force and experimental investigation of optimum burnishing force in roller burnishing process", Indian Journal of Science and Technology Vol. 3 No. 7 (July 2010).
- [14] U M Shirsat and B B Ahuja,"Parametric analysis of combined turning and ball burnishing process", Indian Journal of Engineering and material sciences, Vol.11, October (2004), pp.391-396.
- [15] Feng Lei Li et.al., "Analytical prediction and experimental verification of surface roughness during the burnishing process", International Journal of Machine Tools & Manufacture 62 (2012) 67–75.
- [16] Wit Grzesik and Krzysztof Zak, "Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations", Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 315–322.
- [17] S. Thamizhmanii, B. Saparudin & S. Hasan , "A study of multi-roller burnishing on non-ferrous metals", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering volume 22 issue 2 June (2007).
- [18] Başar, Gökhan, and Funda Kahraman. "Analysis and Optimization of Ball Burnishing Process Parameters of AA 7075 Aluminium Alloy with Taguchi Method." International Advanced Researches & Engineering Congress, Osmaniye (2017).
- [19] Luca, Liviu, Sorin Neagu-Ventzel, and Ioan Marinescu. "Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels." Precision Engineering 29.2, 253-256,(2005).
- [20] Chen, C. H., and F-J. Shiou. "Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 21.3,177-185 (2003)
- [21] Revankar, Goutam D., et al. "Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy." Measurement 58 (2014): 256-268.

- [22] Gharbi, F., et al. "Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates." *Journal of materials engineering and performance* 20.6 (2011): 903-910.
- [23] Malyer, E. Ezerek parlatma yapılan AA7075-T6 alüminyum alaşımında meydana gelen kalıntı gerilmelerin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 565-573, (2018)
- [24] Ghodake, A., Rakhade R., and Maheshwari A. Effect of Burnishing Process on Behavior of Engineering Materials-A Review. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 5.5, 9-20, (2013)
- [25] Gharbi, F., et al. "Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates." *Journal of materials engineering and performance* 20.6, 903-910, (2011).
- [26] Mahto, D. G and Verma A., Roller Burnishing-A Literature Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application. *Asian Journal of Engineering and Technology* 1.3 (2013).
- [27] El-Tayeb, N. S. M., Low K. O., and Brevern P. V. Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. *Journal of materials processing technology* 186.1-3, 272-278, (2007).
- [28] El-Axir, M. H., Othman O. M., and Abodiena A. M. "Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process." *Journal of materials processing technology* 202.1-3, 435-442, (2008).
- [29] Hassan, A. M., Al-Jalil H. F., and Ebied A. A. Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components. *Journal of Materials Processing Technology* 83.1-3, 176-179, (1998).
- [30] Buldum, B. B., and Bayhan B. Effect of ball-burnishing parameters on surface roughness and surface hardness of aluminum alloy 6013." *Materials Testing* 60.4, 418-422, (2018).
- [31] Ovali İ & Akkurt A., Comparison of Burnishing Process with Other Methods of Hole Surface Finishing Processes Applied on Brass Materials, *Materials and Manufacturing Processes*, 26:8, 1064-1072, (2011).
- [32] Egea A.J.S., Rodríguez A., Celentano D., A.Calleja, Lacalle L.N., Joining metrics enhancement when combining FSW and ball-burnishing in a 2050 aluminium alloy, *Surface & Coatings Technology* 367, 327-335, (2019)

## Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of API 5L X70M Steels Welded by Flux Cored Arc Welding Method as Orbital

 Cemil ÇETİNKAYA<sup>1</sup>  Hakan ADA<sup>2,\*</sup>  Murat SEZGİN<sup>3</sup> 
<sup>1</sup>Gazi University, Faculty of Technology, Dept. of Metallurgical and Materials Eng., 06500, ANKARA

<sup>2</sup>Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Mechanical Eng., 37150, KASTAMONU

<sup>3</sup>Gazi University, Institute of Science, Dept. of Metallurgical Education, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 25/09/2020

Revision: 22/11/2020

Accepted: 22/11/2020

#### Highlights

- Welding
- Microstructure
- Mechanical properties

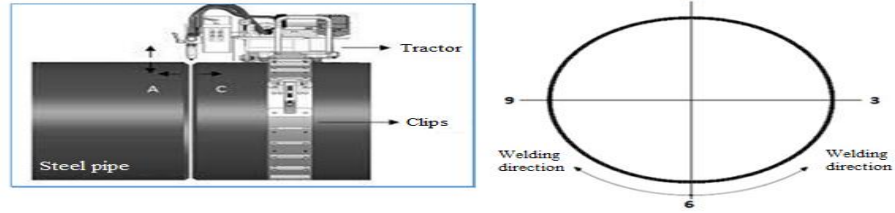
#### Keywords

Orbital

API 5L

Flux cored arc welding

In this study; a practice has been conducted to examine the performance of orbital flux cored arc welding (FCAW) method, which is a new method. Steel pipes of API 5L X70M quality produced for oil and natural gas pipelines were used in the experiments. Experiments were carried out under industrial field conditions in order to reach realistic results. The test samples were joined by orbital gas metal arc welding (GMAW) method using flux cored wire and the joining samples were examined in detail and the metallurgical and mechanical properties of the weld zone were analyzed.



**Figure A.** Overview of orbital welding system basic working principle and welding direction

**Purpose:** Gas welding methods; it is a semi-automatic method that is used extensively in industrial applications due to its wire feeding speed and uninterrupted welding ability, and it is important in the transition to automation process in welding processes. Mechanized gas metal arc welding (orbital GMAW) has been recently used in welded joining of natural gas and petroleum pipelines under construction site conditions, and its use is becoming more and more widespread day by day. In addition, the use of orbital MAG welding (FCAW) made with cored wire has been increasing in recent years due to the ability to add desired alloy elements to the filler metal in order to obtain the mechanical properties expected from welded construction at the desired rate.

**Theory and Methods:** In the orbital welding system, there are equipment such as tractor, control center, wire feeder, power source, control panel, work panel and clamp. The application of the orbital welding system is faster than electric arc welding, because it is a method where the skill and properties of the welder do not affect the welding process with high welding quality and filling rates, and its usage area is increasing. With this method, low and high alloy steels and stainless steels can be welded. Especially the consumables used affect the structure, properties and duration of the welding. Welding is done by means of a manual control panel accompanied by an operator. In addition to welding in any position, the torch can be adjusted at the desired distance.

**Results:** The results have shown that depending on the welding position and speed, ITAB was observed to occur in a narrow area in some regions (1. and 4.), while it was observed to occur in a larger area in some regions (2. and 3.). It has been observed that the data obtained from the mechanical measurements are suitable for the measurements required by the standards.

**Conclusion:** As a result of the examinations; it has been observed that API 5L X70M pipes can be joining with FCAW by orbital method as desired, and the welding process exhibits the expected local properties well. No welding defects such as cracks, tears, pores, slag residues were encountered in macro and micro examinations. These results have shown that welded joining operations are safe and sufficient.





## API 5L X70M Çeliklerinin Özlü Telle Ark Kaynak Yöntemiyle Orbital Birleştirilmesinde Metalurjik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Cemil ÇETİNKAYA<sup>1</sup> Hakan ADA<sup>2,\*</sup> Murat SEZGİN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 37150, KASTAMONU

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada; yeni bir yöntem olan orbital özlü telle ark kaynak yönteminin performansının incelenmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Deneylerde petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L X70M kalitesindeki çelik borular kullanılmıştır. Gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için deneyler saha şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak birleştirilmiş ve birleştirme numuneleri ayrıntılı incelenerek kaynak bölgesinin metalurjik ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde; API 5L X70M borularının özlü tel ile ark kaynağının orbital yöntemle istenilen şekilde birleştirilebildiği, kaynak işleminin kendinden beklenen lokal özellikleri iyi bir şekilde sergilediği görülmüştür. Yapılan makro ve mikro incelemelerde çatlak, yırtılma, gözenek, cüruf kalıntısı gibi kaynak hatalarıyla karşılaşmamıştır. Bu da kaynaklı birleştirme işlemlerinin emniyetli ve yeterli olduğunu göstermiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 25/09/2020  
Düzeltilme: 22/11/2020  
Kabul: 22/11/2020

### Anahtar Kelimeler

Orbital,  
API 5L,  
Özlü telle ark kaynağı

### Keywords

Orbital,  
API 5L,  
Flux cored arc welding

## Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of API 5L X70M Steels Welded by Flux Cored Arc Welding Method as Orbital

### Abstract

In this study; a study has been conducted to examine the performance of orbital flux cored arc welding (FCAW) method, which is a new method. Steel pipes of API 5L X70M quality produced for oil and natural gas pipelines were used in the experiments. Experiments were carried out under construction site conditions in order to reach realistic results. The test samples were joined by orbital gas metal arc welding (GMAW) method using flux cored wire and the joining samples were examined in detail and the metallurgical and mechanical properties of the weld zone were analyzed. As a result of the examinations; it has been observed that API 5L X70M pipes can be joining with FCAW by orbital method as desired, and the welding process exhibits the expected local properties well. No welding defects such as cracks, tears, pores, slag residues were encountered in macro and micro examinations. These results have shown that welded joining operations are safe and sufficient.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğalgaz ve petrol gibi akışkanlar, büyük çaplı ve yüksek basınca dayanıklı borularla şehirlere iletilir ve oradan da kullanıcılara dağıtılır. Bu iletim ve dağıtım işlemlerinde yüksek basınca karşı sergilediği üstün mekanik özellikler ve üretim kolaylığı nedeniyle genellikle çelik borular tercih edilir. Doğalgaz ve petrol iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan borular yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (YMDA) çeliklerden üretilirler. YMDA çelikleri; düşük alaşımlı olmasına rağmen, kontrollü haddeleme, termomekanik işlemler ve tane inceltici alaşım elementlerinin içyapı içerisine takviye edilmesi neticesinde yüksek mukavemet sergileyen özel çelik gruplarından biridir [1-8].

Doğalgaz ve petrol boruları ASTM ya da API 5L standardına uygun olarak üretilmektedir[9-11]. Bu çalışmada kullanılan X70M çeliklerinin kimyasal ve mekanik şartnameleri de API 5L standardına göre belirlenmiştir [11]. X70M çelikleri doğalgaz ve petrol iletim hatlarında yoğunlukla kullanılan YMDA çelik

serilerindedir [4,6]. Bu çelikler API 5L standardında X taksonomisinde değerlendirilmektedir. API 5L standardında X sınıfında değerlendirilen bu malzemelerin temel özelliği asiküler ferrit ve perlit yapının kontrollü termomekanik haddeleme ile üretilmesi neticesinde sahip olduğu ince taneli yapıdır. İnce taneli yapının elde edilmesinde X grubu çeliklerin üretilmesinde ana mikroalaşım elementi olarak kullanılan niyobyum ve niyobyumun vanadyum ve titanyum ile kombinasyonları (Nb/V, Nb/Ti, Nb/V/Ti) ince tane yapısının oluşmasında önemli bir etki oluşturmaktadır [4]. Bu alaşım elementleri, kontrollü termomekanik haddeleme esnasında tanelerin irileşmesine izin veremeyerek, malzemelerin akma/çekme mukavemeti ve tokluğuna önemli katkılar sağlamaktadır. Yüksek mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra, düşük maliyetli olmaları ve kolay elde edilebilmeleri nedeniyle yoğunlukla tercih edilmektedir [6,7,9].

Doğalgaz boru hatları için üretilen borular genellikle tozaltı kaynak yöntemi ile üretilmektedir. Boruların sahada birleştirme işlemleri ise çoğunlukla örtülü elektrotla (bazik, selülozik) elektrik ark kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Son zamanlarda, yapım işi imalat sürecini hızlandırarak, enerji, maliyet ve zamandan tasarruf etmek için sahada yapılan birleştirme işlemlerinde gazaltı kaynak yöntemleri de denenmektedir. Örtülü elektrotla ark kaynağı manuel bir kaynak yöntemi olup, prosesin performans ve başarısı tamamen optimum kaynak parametrelerinin tercih edilmesine ve kaynakçının maharetine bağlıdır [6]. Aynı zamanda manuel kaynak işlemleri kaynak güvenilirliğini sağlamak için yavaş hızlarda yürütülmektedir. 3600 mm çapındaki bir borunun manuel kaynak işlemi yaklaşık 1 gün sürebilmektedir. Güvenli bir şekilde boru hattı yapım işlerini hızlandırmak ve zaman, enerji ve ekonomiden tasarruf etmek için son yıllarda saha kaynak işlemlerinde yarı mekanize yöntemler denenmektedir. Bu yöntemler genellikle gazaltı kaynak yönteminin mekanize edilmiş türevleridir. Gazaltı kaynak yöntemleri; tel besleme hızı ve kesintisiz kaynak yapabilme özelliği nedeniyle sanayi uygulamalarında yoğun olarak kullanılan yarı otomatik bir yöntem olup, kaynak işlemlerinde otomasyon sürecine geçiş noktasında önemli bir yer tutmaktadır. Mekanize (Orbital MIG-MAG) gazaltı kaynağı doğalgaz ve petrol boru hatlarının kaynaklı birleştirme işlemlerinde şantiye şartlarında son zamanlarda denenmekte olup, kullanımı her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır. Ayrıca kaynaklı konstrüksiyondan beklenen mekanik özelliklerin istenilen oranda elde edilebilmesi için dolgu metaline arzu edilen alaşım elemanlarının ilave edilebilmesi özelliği nedeniyle özlü telle gerçekleştirilen orbital MAG kaynağının (FCAW) kullanımı da son yıllarda giderek artış göstermektedir [12].

Gelişmekte olan teknolojiler ile birlikte kaynak yöntemlerinde de birçok değişim ve yenilikler de kaçınılmaz olmuştur. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında örtülü elektrot ile ark kaynak yöntemine alternatif olarak orbital-kaynak sistemi ile çalışmalar başlamıştır. Orbital- kaynak sistemine MIG, MAG ve TIG kaynak yöntemleri uyarlanarak kullanılmaktadır [13-15]. Boru kaynaklarında yüksek kaynak metali yağma oranı ve verimlilik ile kendini ön plana çıkartan orbital kaynak sistemi ile yatay ekseninde iki borunun ağzlanması ve traktör ismi verilen torcun hareketini sağlayan elaman ile boru etrafına sabitlenen kelepçe üzerinde boru çevresini istenen hızda götürerek kaynak yapma imkânı sağlamaktadır [13-15]. Orbital kaynak sisteminde traktör, kontrol merkezi, tel sürme ünitesi, güç kaynağı, kontrol paneli, iş paneli ve kelepçe gibi donanımlar bulunmaktadır. Orbital kaynak sistemi uygulama olarak elektrik ark kaynağına göre daha hızlı, yüksek kaynak kalitesi ve dolgu oranları ile kaynakçının maharet ve özelliklerinin kaynak işlemini etkilemediği bir yöntem olması nedeniyle hızla gelişmekte ve kullanım alanı artmaktadır. Bu yöntemle düşük ve yüksek alaşımlı çelikler ile paslanmaz çelikler kaynaklanabilir. Özellikle kullanılan sarf malzemeleri kaynağın yapısı, özellikleri ve süresine etki etmektedir. Kaynak bir operatör refakatinde manuel kontrol paneli vasıtasıyla kontrol edilerek yapılmaktadır. Her pozisyonda kaynak yapmanın yanında istenilen mesafede torç ayarlanabilmektedir [13-15].

Bu çalışmada; yeni bir yöntem olan orbital MAG kaynak yönteminin performansının incelenmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Deneylerde petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L X70M kalitesindeki çelik borular kullanılmıştır. Gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için deneyler saha şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak (FCAW) birleştirilmiş ve birleştirme numuneleri ayrıntılı incelenerek kaynak bölgesinin metalurjik ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir.

## 2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, API 5L X70M kalitesindeki çelik borular orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme sonucunda metalurjik incelemeler ve mekanik test sonuçlarına bakılarak kaynak işleminin etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Çalışmada 1422,4 mm çapında (56 inç) boyuna dikişli borular; gerçek şantiye şartlarında gerekli donanımlar sağlanarak kaynaklı birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Kök pasonun önemi birçok literatür çalışmasında detaylı olarak anlatılmış [12, 16,17] olup, kök paso ve sıcak paso kaynaklarının özel bir işlem olması ve genellikle boru hatlarında karşılaşılan kaynak hatalarının yoğunlukla kök ve sıcak pasoda meydana gelmesi nedeniyle kaynak güvenilirliği düşünülerek, kök ve sıcak paso kaynak işlemleri manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Kök pasonun haricinde gerçekleştirilen tüm kaynak paso işlemleri otomatik orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Materyal (Material)

Deneylerde doğalgaz boru iletim hatlarında kullanılmak üzere üretilen 1422,4 mm (56 inç) çapında, 19,45 mm kesit kalınlığında, API 5L X70M kalitesinde tozaltı ark kaynak yöntemiyle üretilen boyuna dikişli çelik borular kullanılmıştır. X70M malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kök paso kaynak işleminde AWS 5.1 standardında E6010 kodlu selülozik elektrot kullanılmış olup, bu elektrodun kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Sıcak paso için kullanılan AWS 5.5 standardında E9018-G-H4R kodlu bazik elektrotun kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Dolgu ve kapak paso kaynak işlemlerinde orbital-MAG kaynağı ile 1,2 mm çapında AWS 5.36 standardında E91T1-M21A6-K2 kodlu rutil özlü tel elektrod kullanılmıştır. Bu özlü tel elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri ise Tablo 4’te verilmiştir. Koruyucu gaz atmosferi ise ENISO 14175-M21-ArC 20 kodlu %80 Ar - %20 CO<sub>2</sub> atmosferinden oluşan karışım gaz olarak belirlenmiştir. Çalışma basıncı ise 80 CFH olarak belirlenmiştir.

**Tablo 1.** API 5L X70M çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
	0,0768	0,148	1,797	0,0067	0,001	0,0262	0,0921	0,0139
	Sn	As	Ga	Sb	B	N	Nb+Ti+V	
	0,0002	0,0037	0,0017	0,0049	0,0007	0,0053	0,0523	
	Cu	Al	Ti	V	Nb	Pb	Fe	CEŞ
	0,0803	0,0363	0,016	0,031	0,071	0,0025	97,5847	0,40
<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>Akma Mukavemeti. (MPa)</b>		<b>Çekme Mukavemeti. (MPa)</b>		<b>Uzama (%) (min.)</b>		<b>Darbe Enerjisi (-10 °C) (Joule)</b>	
	585		620		31		346	

**Tablo 2.** E6010 kodlu selülozik elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr	
	0,129	0,188	0,451	0,008	0,008	0,024	
	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb	
	0,043	0,013	0,054	0,013	0,006	0,001	
<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>Akma Muk. (MPa)</b>		<b>Çekme Muk. (MPa)</b>		<b>Uzama (%) (min.)</b>		<b>Darbe Enerjisi (-30 °C) (J)</b>
	506		568		23		50

**Tablo 3.** AWS 5.5: E9018-G-H4R kodlu bazik elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

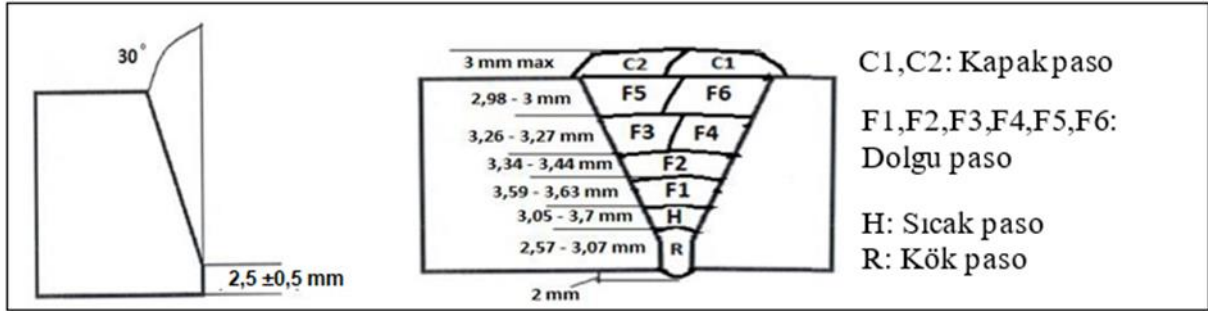
Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr
	0,05	0,4	1,2	0,011	0,006	0,1
	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb
	1,0	0,39	0,001	0,01	0,02	0,01
<b>Mekanik Özellikler</b>	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)	Darbe Enerjisi (-40 °C) (J)
	647		715		20	92

**Tablo 4.** AWS 5.36: E91T1-M21A6-K2-H4 kodlu 1.2mm selülozik özlü telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

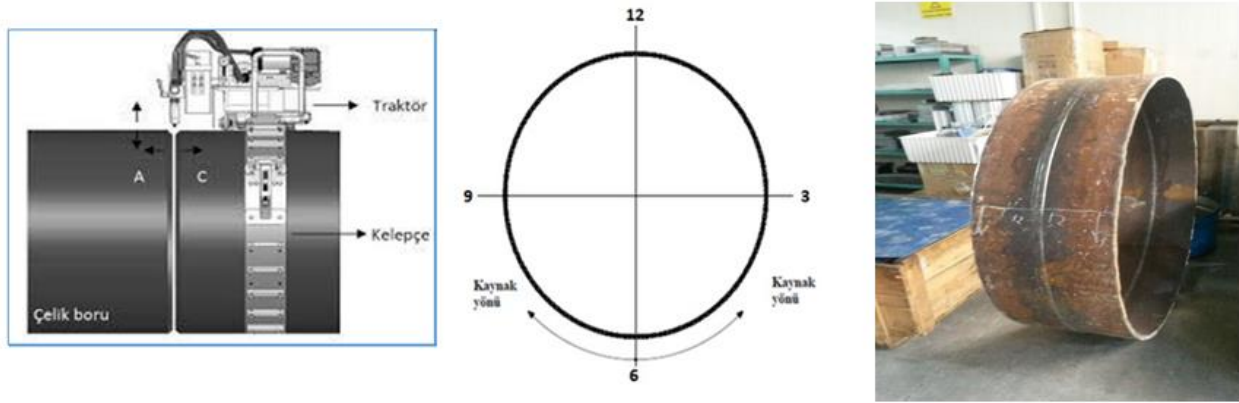
Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr
	0,07	0,39	1,58	0,017	0,007	0,038
	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb
	1,18	0,003	0,076	0,01	0,019	0,014
<b>Mekanik Özellikler</b>	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)	Darbe Enerjisi (-40 °C) (J)
	650		704		20,4	75

## 2.2. Metot (Method)

Plazma ile 350 mm genişliğinde kesilen iki adet API 5L X70M çelik boruya önce mekanik yöntemler ile Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği gibi 30° kaynak ağızı açılmıştır. Kaynak yapılacak bölge mekanik yöntemlerle temizlenerek, ağızlama aparatı vasıtasıyla borular ağız ağıza getirilmiş ve Şekil 1’de gösterilen paso sıralamasına uygun olarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 1.** Kaynak ağızı formu ve paso sıralamasının şematik gösterimi

Kaynak işlemi şematik görüntüsü Şekil 2’de gösterilen orbital kaynak sistemindeki traktör (iki adet) ile 06:00’dan 12:00’ye soldan ve sağdan olacak şekilde uygulanmıştır. Bu uygulama ile ilerleme hızı iki katına çıkarılmaktadır. Kök ve sıcak paso muhtemel kaynak hatalarını minimize etmek amacıyla elektrik ark kaynak yöntemiyle, dolgu ve kapak pasolar ise orbital-MAG kaynak yöntemiyle (FCAW) birleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce birleştirme numuneleri 100 °C sıcaklıkta ön tavlama işlemine tabi tutulmuş olup, tanelerin irileşmesini önlemek için pasolararası sıcaklık maksimum 200 °C’de tutulmuştur. Kaynak işlemi gerçekleştirilen birleştirme numunesi ise yine Şekil 2’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Orbital kaynak sistemi temel çalışma prensibi, kaynak yönü genel görünümü ve kaynaklı test numunesi[13, 14].

Kaynak işlemleri Tablo 5'te verilen parametreler dahilinde doğalgaz boru hattı yapım işini gerçekleştirmeye yetkili ve sertifikalı operatör ve kaynakçılar tarafından saha şartlarında gerçekleştirilmiştir. Böylece kaynaklı bağlantıdan beklenen lokal özelliklerin saha şartlarına uygun olarak karşılanabilirliği de test edilmiştir. Kök ve sıcak paso kaynak işlemleri 300 A akım şiddeti değerine kadar kaynak yapabilme imkânı sağlayan ESAB marka, ORIGO TIG 3001 model örtülü elektrot ile ark kaynağı yapabilen kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Dolgu ve kapak paso kaynaklarında ise 425 A akım şiddeti değerine kadar kaynak yapabilme imkânı sağlayan Miller marka, XMT 350 CC/CV model orbital-MAG kaynak makinesi kullanılmıştır. Kaynak işlemi Şekil 1'de görüldüğü gibi tek taraflı 30° toplamda 60° kaynak ağız açısında, kök, sıcak, dolgu ve kapak pasolar olmak üzere toplam 7 katman ve 10 pasoda gerçekleştirilmiştir. Bazı elektrot ile gerçekleştirilen sıcak paso işlemlerinde elektrotlar yaklaşık 300 °C sıcaklıkta fırınlanarak kurutulmuş ve bekletmeden hemen kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Şantiye şartlarında açık havada gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde koruyucu gaz ortamına dışarıdan tesir edebilecek atmosferin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için; kaynak işlemleri portatif bir kulübe içerisinde gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 5.** Deneylerde kullanılan parametreler

Paso	Katman	Metot	Elektrot	Çap (mm)	Gaz Akış Hızı (Ort) (CFH)	Akım Türü
Kök (R)	1	Elk. Ark (SMAW)	A 5.1-E6010	3,25	N/A	DC-
Sıcak (H)	2	Elk. Ark (SMAW)	A 5.5-E9018-G-H4R	2,50	N/A	DC+
Dolgu (F1)	3	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F2)	4	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F3)	5	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F4)	5	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F5)	6	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F6)	6	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Kapak (C1)	7	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Kapak (C2)	7	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+

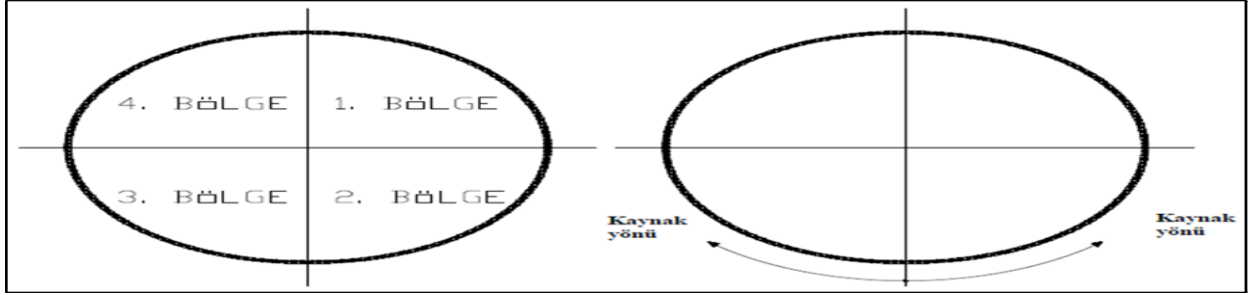
  

Paso	Pozisyon ve Yön	Tel Besleme Hızı (IPM)	Ark Gerilimi (Volt)	Akım Şiddeti (A)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Isı Girdisi (Ort) (kJ/mm)
Kök	5G PF	N/A	28±3	80±5	90±10	1,29
Sıcak (H)	5G PF	N/A	24±3	85±5	90±10	1,23
Dolgu (F1)	5G PF	N/A	24±2	205±15	180±10	1,76
Dolgu (F2)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	165±10	1,87
Dolgu (F3)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	165±10	1,95
Dolgu (F4)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	160±10	1,94
Dolgu (F5)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	195±10	1,27
Dolgu (F6)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	190±10	1,62
Kapak (C1)	5G PF	250 - 350	24±2	200±10	155±10	1,98
Kapak (C2)	5G PF	250 - 350	24±2	200±10	150±10	1,91

Birleştirmelerde kök paso uygulaması  $80 \pm 5$  A akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilirken, sıcak paso uygulaması  $85 \pm 5$  A arasında akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Dolgu pasodaki kaynak işlemleri  $205 \pm 15$  A akım şiddeti, kapak pasodaki kaynak işlemleri ise  $200 \pm 10$  A akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Kök paso kaynak işlemi; kökte yanma oluşu gibi kritik hatalar oluşturmamak ve yetersiz ergimeden kaynaklı riskleri minimize etmek için, DC- kutupta gerçekleştirilmiştir. Diğer paso uygulamaları ise DC+ kutupta gerçekleştirilmiştir. Dolgu pasolarında tel besleme hızı 280-400 ipm (inç/dak) kapak pasolarında 250-350 ipm olarak gerçekleştirilmiştir.

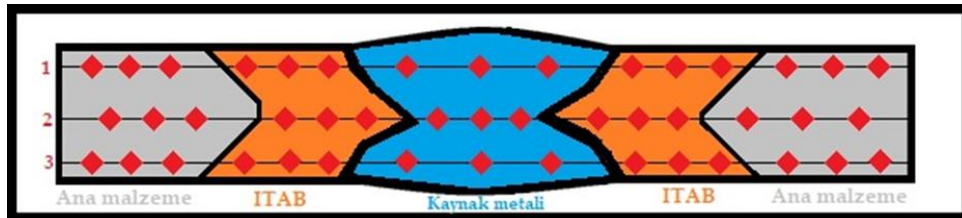
#### Numune hazırlama

Tahribatlı testler için numune hazırlama aşamasında; numune alınacak bölgeler Şekil 3'te şematik olarak gösterildiği gibi ve API 1104 standardına uygun olarak 4 bölgeye ayrılmış ve numuneler bu bölgelerden hazırlanmıştır. İncelemeler, kaynak yönüne göre saat pozisyonlarında (12:00 – 3:00, 3:00 – 6:00, 6:00 – 9:00, 9:00 - 12:00) değerlendirilmiştir. Saat 12:00 – 03:00 bölgesi 1. Bölge, 03:00 – 06:00 bölgesi 2. Bölge, 06:00 – 09:00 bölgesi 3. Bölge ve 09:00 – 12:00 bölgesi 4. Bölge olarak adlandırılmıştır. Her bir deney parçasından alınan test sonuçları kendi içinde değerlendirilmek üzere bölgesel olarak incelenmiştir. Şekil 3'te şematik olarak gösterilen 4 boru bölgesinden ayrı ayrı olmak üzere çekme, eğme ve makro - mikro yapısal incelemeler ile sertlik testleri için test numuneleri hazırlanmıştır.



**Şekil 3.** Mekanik test ve mikroyapı numunesi alınan bölgelerin şematik gösterimi ve kaynak yönü

Makro ve mikro analizleri gerçekleştirmek üzere; API 1104 standardında belirtilen bölgelerden birer adet toplamda 4 adet makroyapı / mikroyapı numunesi alınmıştır. Numuneler zımparalama ve parlatma işleminden sonra % 3 Nital ( $\text{HNO}_3$ ) çözeltisiyle dağlanmıştır. Mikroyapı fotoğrafları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarındaki LEICA marka ters optik mikroskop yardımıyla görüntülenmiştir. Numuneler makroyapı ve mikroyapı analizlerine tabi tutulduktan sonra makrosertlik testlerine de tabi tutulmuştur. Sertlik testi uygulamaları boru imalatçıları tarafından kullanılan 10 kg'lık yük ile TS EN ISO 9015-1 standardına uygun olarak Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş. Laboratuvarlarında bulunan Struers marka, Duramin A300 model, tam pnömomatik, değişken yüke sahip, Vickers cinsinden ölçümler yapabilen cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çok pasolu kaynak işleminde pasoların sertliğe olan etkisi düşünülerek; sertlik ölçümlerinden daha efektif bir sonuç elde etmek için, Şekil 4'te şematik olarak gösterildiği şekilde 3 katmandan toplamda 45 adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.** Sertlik ölçümleri alınan bölgeler ve katmanlar

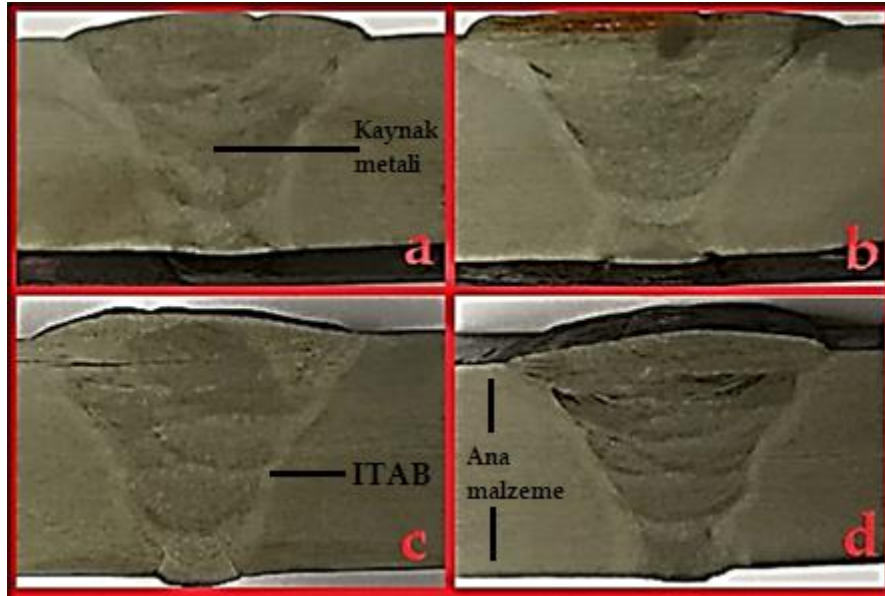
Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelere ayrıca çekme ve eğme testleri gerçekleştirmek amacıyla standart test numuneleri hazırlanmıştır. Akma, çekme, kopma mukavemeti ile % uzama değerlerinin bulunmasını sağlayan ve sabit hız – sıcaklıkta, artan yük ile numuneyi koparmak için uygulanan çekme testleri kapsamında; numuneler API 1104 ve ASTM E8 standardına uygun olarak, her bölgeden birer adet toplamda 4 adet test numunesi

olacak şekilde hazırlanmıştır. Kaynak bölgesinde olası bir süreksizliğin ilerleme hızını ölçmek amacıyla gerçekleştirilen eğme testleri kapsamında; numuneler TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Standart gereği boru dış çapı 323 mm'den daha büyük olduğu için birleştirmelerden yan eğme numuneleri de alınmıştır. Eğme testi her bölgeden ikişer adet, kök ve yüzey bükme şeklinde olmak üzere toplamda 16 adet alınarak işlem gerçekleştirilmiştir. Çekme ve Eğme testleri Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş.'nin Ankara Fabrikasında bulunan 600 kN çekme kapasitesine sahip Instron marka cihazda "TS EN ISO 4136" standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

### 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENT RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada doğalgaz dağıtım ve iletim hatlarında kullanılan ve Tablo 5'te verilen parametrelere uygun olarak saha şartlarında mekanize sistemle birleştirilen API 5L X70M çelik boru malzemesinden elde edilen numunelerin mekanik ve metalurjik özellikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda numuneler mekanik testler ve metalografik analizler ile ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla değerlendirilerek tartışılmıştır.

Tablo 5'te verilen parametrelere uygun olarak birleştirilen API 5L X70M kalitesindeki borulardan alınan metalografik inceleme numunelerinin makroyapı görüntüleri Şekil 5'te verilmektedir. Görüntüler Şekil 3'te şematik olarak gösterilen bölgelerden alınan metalografik inceleme numunelerinden elde edilmiştir.

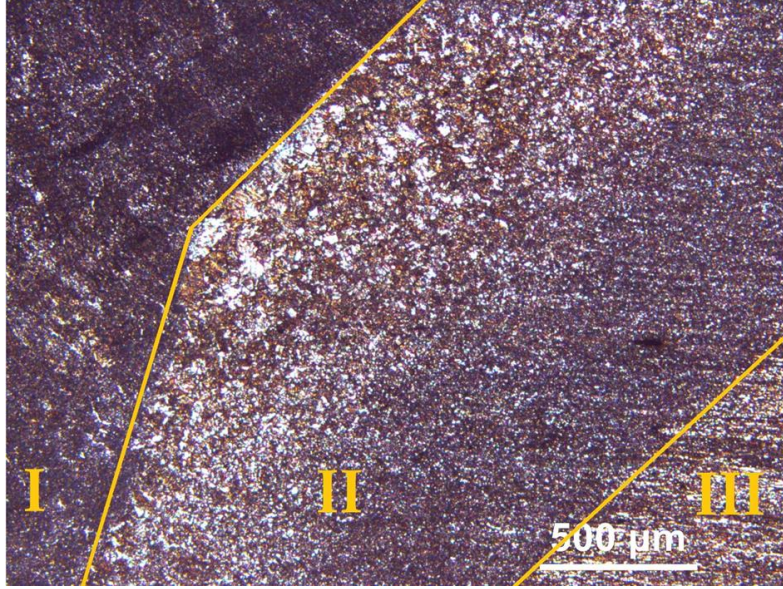


Şekil 5. Makroyapı görüntüleri a. 1. Bölge, b. 2. Bölge, c. 3. Bölge, d. 4. Bölge (1:1 büyütme)

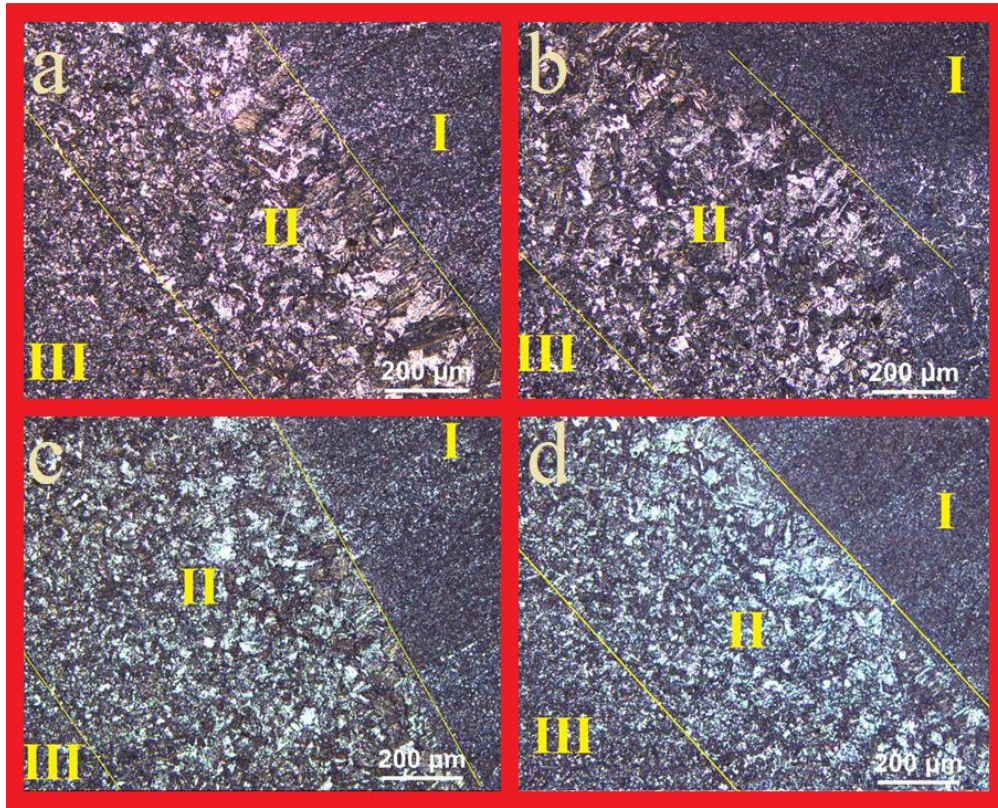
Şekil 5'te verilen makroyapı görüntülerinden birleştirmelerde herhangi bir gözenek, cüruf, yanma çentiği v.b. hataların olmadığı görülmektedir. 10 pasoda gerçekleşen kaynak işleminde pasoların görüntüsü de net bir şekilde görülmektedir. Ana metal ve kaynak metali arasında ergime - katılma olmadan yüksek ısı etkisi ile yapısal olarak değişime uğrayan ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) makroyapı fotoğraflarında görülmektedir. Görüntülerde ITAB genişliğinin bölgesel olarak farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Numune a (1. Bölge) ve d'de (4. Bölge) görülen ITAB bölgesi daha dar iken numune b (2. Bölge) ve c'de (3. Bölge) ITAB daha geniş bir alanda oluşmaktadır. Bunun temel nedeni kaynak pozisyonu ve yönüne bağlı olarak oluşan ısı girdisidir. 1 (a) ve 4 (d) numaralı bölgelerde kaynak pozisyonuna bağlı olarak ısı girdisi daha az iken, 2 (b) ve 3 (c) numaralı bölgelerde yine pozisyona bağlı olarak ısı girdisi daha fazladır. Birleştirme işlemlerinde önceki pasoların, daha sonra uygulanacak pasolara bir nevi normalizasyon ısı işlemi gerçekleştirdiği de görülmüştür. Bu nedenle çok pasolu gerçekleşen birleştirme işlemlerinde orijinal kaynak metali tane yapısının sadece kapak pasolarda oluştuğu söylenilebilir[7].

Tablo 5'te verilen parametreler dâhilinde birleştirilen API 5L X70M kalitesindeki boruların kaynaklı bölgelerinden mikroyapı görüntüleri de alınmıştır. Mikroyapı sonuçlarında ana malzeme ve boru numunesinin farklı bölgelerinden alınan görüntüler yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda Şekil 3'te şematik olarak belirtilen alanların kaynak bölgelerinden mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Mikroyapı

fotoğraflarında kaynak bölgesinin tüm bölgeleri (kaynak metali, ITAB, ana malzeme) ayrıntılı irdelenmeye çalışılmış, bu yüzden küçük görüntülemelerle (50x, 100x büyütme) mikroskopta görüntüler alınmıştır. Mikroyapı fotoğrafları genel olarak birbirine benzediği için; mikroskoptaki en küçük görüntüleme birimi olan 50x büyütmede alınan görüntü (Şekil 6) tüm borunun mikroyapı analizini ortaya koymak için ayrıntılı olarak açıklanmaya çalışılmıştır. 100x büyütmede alınan mikroyapı görüntülerinde (Şekil 7) ise kaynak pozisyonuna bağlı olarak ısı girdisinin mikroyapıda meydana getirdiği etkiler açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 6. Kaynak bölgesi genel mikroyapı görüntüsü (50x büyütme)

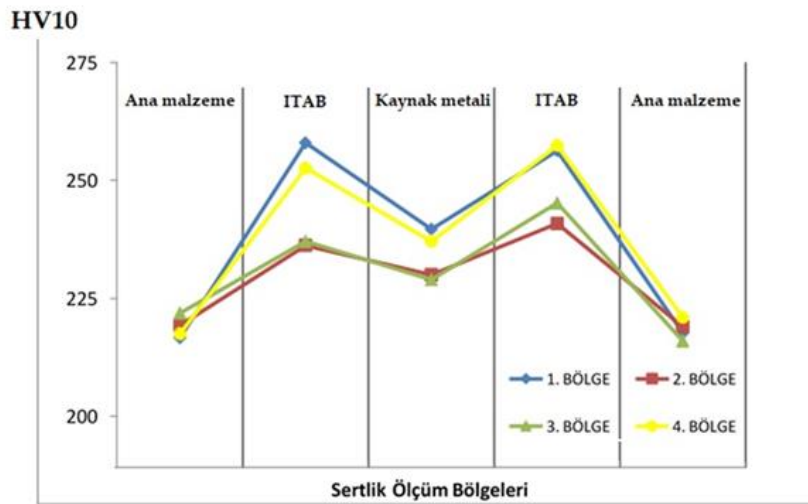


Şekil 7. Mikroyapı görüntüleri – 100x (I. Kaynak metali, II. İri taneli bölge, III. İnce taneli bölge)  
a)1. Bölge, b)2. Bölge, c)3. Bölge, d)4. Bölge



Şekil 6'da 50x büyütmede verilen mikroyapı görüntülerinde; I numara; kaynak metalini, II numara; farklı boyutta yapıların hâkim olduğu ısının tesiri altındaki bölgeyi (ITAB), III numara ise ana malzeme bölgesini ifade etmektedir. I numara ile belirtilen bölge kaynak metaline tane yapısı olup, ince tanelidir. Bu yapının oluşmasında; yoğun ısı girişinden sonra mikroyapıda oluşan asiküler ferrit, beynit ve martensit gibi fazların varlığının neden olduğu bilinmektedir [8,18,19,20]. Şekil 6'da II numara ile belirtilen alan ITAB'ı ifade etmektedir. ITAB tane yapısı içerisinde farklı boyut ve tane yapılarının varlığı göze çarpmaktadır. Kaynak metaline yakın bölgelerde iri taneli bölge oluşurken, iri taneli bölgenin hemen yanında ince taneli bölge oluşmaktadır [19-21]. III numara ile belirtilen bölge ise ince taneli, eş eksenli ve  $\alpha$  ferrit ile perlit fazlarından oluşan tipik çelik ana malzeme mikroyapısını ifade etmektedir. Şekil 3'te şematik olarak gösterilen dört farklı bölgeden alınan numunelerin iri taneli bölgelerinin genişliği, buradan da ITAB genişliğini tayin edebilmek amacıyla 100x büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7'de verilmiştir. 1. Bölgenin fotoğrafı Şekil 7.a'da, 2. Bölgenin fotoğrafı Şekil 7.b'de, 3. Bölgenin fotoğrafı Şekil 7.c'de, 4. Bölgenin fotoğrafı ise Şekil 7.d'de verilmiştir. Şekil 7'de verilen mikroyapı görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde; elde edilen sonuçlar şu şekilde açıklanabilir. 100x büyütmede alınan fotoğraflarda kaynak metalini, iri taneli bölge ve ince taneli bölgenin bir kısmı görülmekte olup, kaynak pozisyonuna bağlı olarak oluşan ısı girdisinin iri taneli bölgenin genişliğine bakılarak 4 bölgede farklılıklar gösterdiği görülmüştür. 2. ve 3. bölgelerde tavan kaynağı pozisyonunda kaynak işlemleri gerçekleşmiş ve bu pozisyonun etkisiyle ısı girdisi bu bölgelerde yükselmiştir. Elde edilen görüntülerde 2. ve 3. bölgelerde (Şekil 7 - b ve c) iri taneli bölgenin 1. ve 4. Bölgelere (Şekil 7 - a ve d) oranla bir hayli geniş bir alanda oluştuğu görülmektedir. 1. ve 4. bölgelerde nispeten alın kaynağına yakın bir uygulama ile daha dar bir iri taneli bölge mikroyapısının oluştuğu görülmüştür. Bu duruma sebep kaynak pozisyonuna bağlı olarak oluşan ısı girdisidir. Isı girdisinin; tavan pozisyonunu ifade eden 2. ve 3. bölgelerde daha yoğun oluştuğu, alın kaynağını ifade eden 1. ve 4. bölgelerde ise daha düşük oranda oluştuğu iri taneli bölgelerin genişliğine bakılarak belirlenmiştir.

Makroyapısal ve mikroyapısal incelemelerden sonra, kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için birleştirmelerden alınan numunelere sertlik, çekme ve eğme testleri uygulanmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak sırayla açıklanmıştır. Önceki aşamalarda mikro ve makroyapı görüntüleri alınan numunelere sertlik testleri uygulanmıştır. 4 ayrı bölgeye Şekil 4'te şematik olarak verilen katman ve bölgelerden 180 adet ölçüm işlemi uygulanıp, ölçümlerin ortalama sonuçları alınarak Şekil 8'de verilen sertlik grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 8. Sertlik sonuçları grafiği

Sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak, Şekil 8'de grafik haline dönüştürülmüştür. Her bir numune kendi içinde değerlendirilecek olursa; buna göre ana malzeme sertlik oranı grafikten de anlaşılacağı üzere ortalama 219 HV ölçülmüş olup, bu değer tüm bölgeler içerisinde en düşük değerdir. ITAB bölgesi sertlik ölçümü ortalaması 248 HV ölçülmüş ve bu değer en yüksek sertlik bölgesidir. Bunun temel nedeni soğuma hızının en hızlı olduğu bölgenin ITAB olması ve ITAB'da özellikle iri taneli bölgede yüksek oranda

martensit fazının oluşmasıdır [22]. Kaynak metalinin ortalama sertliği ITAB'a göre nispeten düşük olsa da ortalama olarak 234 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ısı etkisiyle oluşan asiküler ferrit, beynit ve martensit fazlarının oluşması, dendritik, iğnemsisi ve ince taneli yapılar nedeniyle bu bölgede sertlik ana malzemeye göre yüksektir [22]. Kaynak metali merkezinin, en son katılacak ve soğumanın en son gerçekleştiği bölge olması nedeniyle; bu bölge ITAB'a göre nispeten daha düşük, sahip olduğu fazlar ve iğnemsisi ve dendritik taneli yapılar nedeniyle de ana malzemenin daha yüksek sertlik sergilemiştir [23]. Sertlik sonuçları bölgesel olarak karşılaştırıldığında ise; 1. ve 4. bölgeden alınan sertlik değerlerinin, 2. ve 3. bölgeden alınan değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni kaynak pozisyonundan dolayı ısı girdisinin farklılık oluşturmasıdır. Kaynak hızının sabit olduğu tüm birleştirmelerde 2. ve 3. bölgeler pozisyon itibarıyla daha yüksek bir ısı girdisi ile karşılaşmaktadır. Bu durum, bu bölgelerde sertlik ölçümlerinin 1. ve 4. bölgelere oranla daha düşük sonuçlar vermesine neden olmuştur. 1. ve 4. bölgelerde tavan kaynağından alın kaynağı pozisyonuna geçiş yapılırken, bu bölgelerde 2. ve 3. bölgelere oranla daha düşük ısı girdisi oluşmuş ve daha düşük sertlik sonuçları elde edilmiştir. Isı girdisi arttıkça tane yapısı irileşmiş ve malzemenin sertliği düşmüştür. Standartlara göre (BS4515-1, TS EN ISO 9015-2, TS EN ISO 3183); çelik boru hat kaynaklarında kaynaklı birleştirmelerden alınan sertlik değerlerinin 9,5 mm üzeri borular için maksimum 300 HV değerinde olması gerekliliği belirtilmiş olup, çalışmadan elde edilen sertlik değerleri bu gerekliliği karşılamıştır.

Sertlik testlerinden sonra ana malzeme kaynaklı birleştirmelerden alınan ve ASTM E8 standardına uygun olarak hazırlanan çekme numunelerine API 1104 standardında belirtildiği gibi çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testi sonuçları Tablo 6'da, test uygulanmış numunelerin görüntüsü ise Şekil 9'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Çekme testi sonuçları

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Ana malzeme	585	620	31
1.bölge	618,64	652,83	8,0
2.bölge	617,85	644	11,7
3.bölge	608,49	628,21	14,8
4.bölge	632,79	671,49	15,2
<b>Ortalama (Kaynaklı numuneler)</b>	<b>619,44</b>	<b>649,13</b>	<b>12,4</b>

Çekme testleri sonucunda kopmaların tamamının kaynak bölgesine yaklaşık 40 mm uzaklıktaki ana malzeme tarafından gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 9). Bu da kaynaklı numunenin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi olarak düşünülmektedir[24].



**Şekil 9.** Çekme testi sonrası kaynaklı birleştirme numunelerinin görüntüleri

Yapılan ölçümlerde; ana malzemenin akma mukavemeti 585 MPa ve maksimum çekme mukavemeti 620 MPa olarak belirlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde ise akma mukavemeti ortalaması yaklaşık 620 MPa, maksimum çekme mukavemeti ortalaması ise yaklaşık 650 MPa olarak belirlenmiştir. Kaynak bölgesinin ana malzemeden daha sert bir yapıya sahip olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmekte ve kopma ana malzemede gerçekleşmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemeden olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkmasının sebebi ise kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında daha az deformasyona uğraması olarak düşünülmektedir. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerlerinin azalmasına neden olmaktadır [24]. Bu veriler doğrultusunda kaynak metalinin ana malzemeden daha iyi sonuçlar vererek kendinden beklenen mukavemet değerlerini sergilediği görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerin test sonuçları bölgesel olarak incelendiğinde; Şekil 8’de verilen sertlik sonuçlarındaki gibi, 2 ve 3. bölgeye ait numunelerin çekme değerlerinin daha düşük çıktığı görülmüştür. Buradan anlaşılacağı üzere mikroyapı ve sertlik yorumlarında bahsedildiği gibi ısı girdisinin kaynak pozisyonu nedeniyle daha fazla olduğu bu bölgelerde tane yapısıyla ilişkili olarak akma ve çekme dayanımını diğer bölgelere (1. ve 4. bölge) göre azalttığı söylenebilir [24-26]. Uygulanan ısı girdisinin doğal bir sonucu olarak birleştirmelerdeki en yüksek mukavemet değerleri ortalaması 4. Bölgede oluşurken (akma mukavemeti 632,79 MPa, çekme mukavemeti ise 671,49 MPa), en düşük mukavemet değerlerinin 3. Bölgede (akma mukavemeti 608,49 MPa, çekme mukavemeti ise 628,21 MPa) olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3’te verilen bölgelerden alınan numunelere son olarak TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak eğme testleri uygulanmıştır. Yan eğme olarak kaynağın kök ve yüzeyine uygulanmak üzere ikişer numuneye uygulanan teste 118 mm mandrel çapı ve 146,6 mm kalıp mesafesi belirlenmiştir. Eğme testleri sonuç grafiği Tablo 7’de, test uygulanmış numunelerin görüntüsü ise Şekil 10’da verilmiştir.



**Şekil 10.** Eğme testi sonrası numunelerin örnek görüntüleri

Tablo 7 ve Şekil 10 incelendiğinde; birleştirmelerde makro düzeyde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmektedir. Eğme testlerinde iç yüzeyler basma gerilmesine maruz kalırken, dış yüzeyler çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu gerilmeler kaynaklı birleştirmelerin iç ve dış yüzeylerinde çatlak vb. hataları ortaya koymaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde çatlama ve yırtılma görülmemesi sonucunda birleştirmelerin emniyetli ve yeterli olduğu söylenilebilir. Eğme testi sonuçları Sandness ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile değerlendirildiğinde; bu çalışmadaki birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığı görülmüştür [27].

**Tablo 7. Eğme testi sonuçları**

<i>Bölge No</i>	<i>Saat Pozisyonu</i>	<i>Numune No</i>	<i>Kök Bükme (180°)</i>	<i>Yüzey Bükme (180°)</i>
1.bölge	12:00-03:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok
2.bölge	03:00-06:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok
3.bölge	06:00-09:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok
4.bölge	09:00-12:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Makroyapı fotoğraflarında; ITAB'ın 1. ve 4. bölgede kaynak pozisyonuna bağlı olarak daha dar bir alanda oluştuğu görülürken, 2. ve 3. bölgede daha geniş bir alanda oluştuğu görülmüştür. Mikroyapı incelemelerinde; kaynak pozisyonuna bağlı olarak oluşan ısı girdisinin; tavan pozisyonunu ifade eden 2. ve 3. bölgelerde daha yoğun oluştuğu, alın kaynağını ifade eden 1. ve 4. bölgelerde ise daha düşük oranda oluştuğu fotoğraflardaki iri taneli bölgelerin genişliğine bakılarak belirlenmiştir. Buradan da ısı girdisiyle beraber ısıdan etkilenen bölgelerin 2. ve 3. bölgelerde daha geniş, 1. ve 4. bölgelerde daha dar bir alanda oluştuğu tespit edilmiştir.
- Sertlik ölçümlerinde; 2. ve 3. bölgeler pozisyon itibarıyla daha çok tavan kaynağı pozisyonuna benzediğinden, daha yüksek bir ısı girdisi ile karşılaşmıştır. Bu durum, söz konusu bölgelerdeki sertlik ölçümlerinin, 1. ve 4. bölgelere oranla daha düşük sonuçlar vermesine neden olmuştur. 1. ve 4. bölgelerde 2. ve 3. bölgelere oranla daha düşük ısı girdisi oluşmuş ve daha düşük sertlik sonuçları elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde; tüm numunelerde ITAB'da en yüksek sertlik değerleri görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerden alınan sertlik değerlerinin standartlara uygun bir şekilde; 9,5 mm üzeri borular için 300 HV'den daha düşük değerler sergilediği görülmüştür.
- Çekme testlerinde ana malzemenin akma mukavemeti 585 MPa, maksimum çekme mukavemeti ise 620 MPa olarak belirlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde ise akma mukavemeti ortalaması 620 MPa, maksimum çekme mukavemeti ortalaması ise 650 MPa olarak ölçülmüştür. Çekme testleri sonucunda kaynaklı birleştirmelerdeki kopmaların tamamının kaynak bölgesine yaklaşık 40 mm uzaklıktaki ana malzeme tarafından gerçekleştiği görülmüştür.
- Çekme testi sonuçlarında; 2. ve 3. bölgeye ait numunelerin çekme değerlerinin daha düşük değerler sergilediği görülmüştür. Kaynak pozisyonu nedeniyle ısı girdisinin daha fazla olduğu bu bölgelerde tane yapısıyla ilişkili olarak sertliğin azaldığı, bu da çekme dayanımını diğer bölgelere (1. ve 4. bölge) göre azaltmıştır. Uygulanan ısı girdisinin doğal bir sonucu olarak birleştirmelerdeki en yüksek mukavemet değerleri 4. bölgede oluşurken (akma mukavemeti 632,79 MPa, çekme mukavemeti ise 671,49 MPa), en düşük mukavemet değerleri 3. bölgede (akma mukavemeti 608,49 MPa, çekme mukavemeti ise 628,21 MPa) belirlenmiştir.
- 118 mm mandrel çapı ve 146,6 mm kalıp mesafesinde gerçekleştirilen eğme testleri sonucunda; numunelerde makro düzeyde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür.
- Elde edilen tüm sonuçlar ışığında; API 5L X70M borularının özlü tel ile ark kaynağının orbital yöntemle istenilen şekilde birleştirilebildiği, kaynak işleminin kendinden beklenen lokal özellikleri iyi bir şekilde sergilediği görülmüştür. Yapılan makro ve mikro incelemelerde çatlak, yırtılma, gözenek, cüruf kalıntısı gibi kaynak hatalarıyla karşılaşılması. Bu da kaynaklı birleştirme işlemlerinin emniyetli ve yeterli olduğunu göstermiştir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Buzatti, D.T., Buzatti, J. T., Lemos, G. V. B., Amavisca, C. V., Oliveira, D. L. P., Mattei, F., Dalpiaz, G., Reguly, A., 2020. Towards friction welding to API grade B steel pipes, *Journal of Advanced Joining Processes*, Volume 2.
- [2] Arora, K.S., Pandu, S.R., Shajan, N., Pathak, P., Shome, M., (2018). Microstructure and impact toughness of reheated coarse grain heat affected zones of API X65 and API X80 linepipe steels. *Int J Press Vessels Pip* 163, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.04.004>
- [3] Yeom, K.J., Kim, W. S., Oh, K. H., (2016). Integrity assessment of API X70 pipe with corroded girth and seam welds via numerical simulation and burst test experiments, *Engineering Failure Analysis*, 70, 375–386.
- [4] Hashemi, S.H., Sedghi, S., Soleymani, V., Mohammedyani, D., (2012). CTOA levels of welded joint in API X70 pipe steel , *Engineering Fracture Mechanics* 82, 46–59.
- [5] Arista, B. V., Hallen, J. M., Albiter, A., (2007). Effect of artificial aging on the microstructure of weldment on API 5L X-52 steel pipe, *Materials Characterization*, 58, 721–729.
- [6] Ada, H., Çetinkaya, C., (2019). Optimization of maximum tensile strength of welded joints of API 5L X65 pipes by Taguchi method, *MaterialsResearch Express*, 6, 036526.
- [7] Ada, H., Çetinkaya, C., and Durgutlu, A., (2019). Radiographic and macrographic investigations of welding parameters determined by Taguchi method in API 5L X65 pipe joints, *Journal of Polytechnic*, 22(2): 375-384.
- [8] Sung, H. K., Shina, S. Y., Cha, W., Oh, K., Lee, S., Kim, N. J., (2011). Effects of acicular ferrite on charpy impact properties in heat affected zones of oxide-containing API X80 linepipe steels, *Materials Science and Engineering A*, 528, 3350–3357.
- [9] Stewart, M., (2016). Material requirements. *Surface Production Operations*, Vol III: Facility Piping and Pipeline Systems. Gulf Professional Publishing.
- [10] Specification API 5L, (2018). Specification for line pipe, 46th Edition ed., American Petroleum Institute.
- [11] Saoudi, A., Fellah, M., Sedik, A. et al., (2019). Assessment and statistical correlation of mechanical properties of double sided single pass submerged arc welded line pipe steel, *Engineering Science and Technology an International Journal*, 23(2), 452-461.
- [12] Torbati, A.M., Miranda, R.M., Quintinoc, L., Williams, S., Yappa, D.,(2011). Optimization procedures for GMAW of bimetal pipes, *Journal of Materials Processing Technology* 211, 1112–1116.
- [13] Karakaş E., (1998). Quality and Automation in welding of Tubes, *Orbital-MAG Welding Systems*, *Proceedings of Pipeline Welding*, 99, 222-229.
- [14] Dilibal, S., Tansuğ, D., Koçak, M. (2015). Robotlu, Mekanize ve Orbital-MAG Kaynak Uygulamalarında Operatör Eğitimi, *Kaykon 9. Ulusal Kongre ve Sergisi*, 211-217.
- [15] Gençkan, D. H., Bal, E., Şahin, F. Ç., Taptık, İ. Y., Koçak, M., (2013), Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of X65 and X70 Grade Pipes Welded with Orbital Welding Technology, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 10(4), 45-56.
- [16] Sabapathy, P.N., Wahab, M.A., Painter, M.J., (2001). Numerical models of in-service welding of gas pipelines. *Journal of Materials Processing Technology* 118, 14-21.

- [17] Wahab, M.A., Sabathy, P.N., Painter, M.Y., (2005). The on set of pipewall failure during in service” welding of gas pipelines. *Journal of Materials Processing Technology* 108, 422–441.
- [18] Costin, W. L., Lavigne, O., Kotousov A., (2016). A study on the relationship between microstructure and mechanical properties of acicular ferrite and upper bainite, *Materials Science & Engineering A*, 663, 193-203.
- [19] Yang, J. H. , Liu, Q. Y., Sun, D. B., Li, X. Y., (2010), Microstructure and transformation characteristics of acicular ferrite in high niobium-bearing microalloyed steel, *Journal of Iron and Steel Research*, 17(6): 53-59.
- [20] Tang, Z. H., Stumpf, W., (2008). The Role of molybdenum additions and prior deformation on acicular ferrite formation in microalloyed Nb-Ti low-carbon line-pipe steels. *Materials Characterization*, 59(6): 717.
- [21] Beidokthi, B., Koukabi, A.H., and Dolati, A., (2009). Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1-9.
- [22] Spanos, G., Fonda, R.W., Vandermeer, R.A., Matuszeski, A., (1995), Microstructural changes in HSLA-100 steel thermally cycled to simulate the heat-affected zone during welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26, 3277-3293.
- [23] Zhu, M.L., Xuan, F.Z., (2010). Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels, *Materials Science and Engineering A*, 527, 4035–4042.
- [24] Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A. (2005). Investigation of the effect of electrode extension distance on microstructural and mechanical properties of low carbon steel welded with submerged arc welding, *Gazi University Journal of Science*. 473–480
- [25] Aksöz, S., Ada, H. Özer, A., (2017). Microstructure and mechanic properties of API 5L X70 grade steel pipes produced by submerged arc welding method, *Gazi University Journal of Science Part C*, 5, 55–64.
- [26] Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., Romanoff, J. (2014). Influence of grain size distribution on the hall–petch relationship of welded structural steel. *Materials Science and Engineering*, 592, 28–39.
- [27] Sandnes L., Romere L., Berto F., Welo T., Grong Q, (2019), Assessment of the mechanical integrity of a 2 mm AA6060-T6 butt weld produced using the hybrid metal extrusion & bonding (HYB) process – Part I: Bend test results, *Procedia Manufacturing*, 34, 147-153.

## Increasing the Strength of Bolted Sandwich Composite Joints with Carbon Fiber Inserts

Tolga TOPKAYA 

Batman University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 72100, BATMAN

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the Joint performance of sandwich composites with carbon fiber reinforced composite face sheet investigated. Sandwich composite specimens were produced for different face sheet thickness, core material height, joint hole diameter parameters. Carbon fiber reinforced composite inserts used to increase the joint strength of specimens.

#### Article Info:

Research article

Received: 02/10/2020

Revision: 24/11/2020

Accepted: 01/12/2020

#### Highlights

- Sandwich Composites
- CFRP Insert
- Joint Design
- Tensile Test

#### Keywords

Carbon Fiber Composite  
 Sandwich Composite  
 Materials  
 Lap Joint

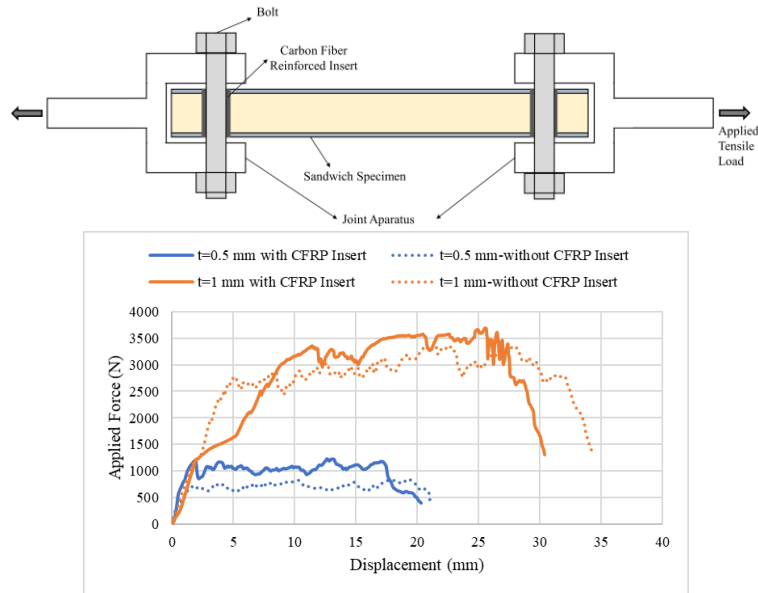


Figure A. Experimental test setup and effect of CFRP insert

**Purpose:** In this study, it is aimed to increase the bond strength of sandwich composites by using carbon fiber reinforced insert material. Honeycomb sandwich composite samples with carbon fiber reinforced composite face sheet, which is frequently preferred in aviation, were produced.

**Theory and Methods:** Carbon fiber-reinforced composite materials were used as face sheets. Face sheet thickness was chosen as 0.5 mm and 1 mm and Aluminum honeycomb core cell size was 6.35 mm. core height was chosen as 10 mm, 15 mm, and 20 mm. Produced sandwich specimens joined with one and two serial bolts. The tensile load was applied to joints for calculating the tensile strength. Carbon fiber-reinforced inserts were located in the bolt holes for increasing the joint strength.

**Results:** The results have shown that using carbon fiber reinforced insert increased tensile strength of sandwich composite joints. Using carbon fiber reinforced inserts, for increasing the joint strength caused a %91 increase in joint strength of samples with 0.5 mm face sheet thickness.

**Conclusion:** As a result of the experimental study carried out, in the case of using carbon fiber reinforced insert material, the highest strength increase was seen in samples with having 0.5 mm face sheet material. If the connection was made with two bolts instead of one bolt, the strength increases in the samples using 8 mm bolts was higher than the samples using 10 mm bolts. Shear damage occurred in all samples.



## Cıvata ile Birleştirilmiş Sandviç Kompozitlerin Bağlantı Mukavemetinin Karbon Fiber Takviye Kullanılarak Arttırılması

Tolga TOPKAYA

Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, BATMAN

### Öz

Sandviç kompozit malzemeler düşük ağırlıkla birlikte sundukları yüksek mukavemet sayesinde birçok mühendislik uygulamasında tercih edilir. Gerçekleştirilen çalışmada cıvata ile birleştirilen karbon fiber yüzey malzemesi ve alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerin çekme yüklemesi durumunda davranışları incelenmiştir. Farklı yüzey malzemesi kalınlığı, hücre yüksekliği, cıvata sayısı ve cıvata çaplarında numuneler üretilmiştir. Belirtilen parametrelere ek olarak cıvata bağlantısı için sandviç kompozit numunelere açılan delikler karbon fiber takviyeli kompozit malzeme ile takviye edilmiş ve bağlantıların çekme davranışı takviyesiz malzeme ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yüzey malzemesi kalınlığını artmasının bağlantı mukavemetini %91 oranında arttırdığını ancak buna karşın çekirdek malzemesi kalınlığının artmasının bağlantı mukavemetini düşürdüğünü göstermiştir. Sandviç numunelerde açılan delikleri takviye etmek için karbon fiber takviyeli kompozit kullanılması 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip numunelerde bağlantı mukavemetini %48 arttırmıştır. Özellikle en ince yüzey malzemesi kalınlığı değeri olan 0.5 mm için bağlantı mukavemetindeki artış daha belirgin olmuştur.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 02/10/2020  
Düzeltilme: 24/11/2020  
Kabul: 01/12/2020

### Anahtar Kelimeler

Karbon Fiber Kompozit  
Sandviç Kompozit  
Malzeme  
Bindirmeli Bağlantı

### Keywords

Carbon Fiber Composite  
Sandwich Composite  
Materials  
Lap Joint

## Increasing the Strength of Bolted Sandwich Composite Joints with Carbon Fiber Inserts

### Abstract

Sandwich composite materials are preferred in many engineering applications thanks to having the high strength they offer together with low weight. In this study, the tensile loading behavior of sandwich composites produced with carbon fiber face sheet material and aluminum honeycomb core joined with bolts was investigated. Samples were produced with different surface material thickness, cell height, bolt number and bolt diameters. In addition to the specified parameters, the holes drilled into the sandwich composite specimens for bolt connection were reinforced with carbon fiber reinforced composite material and the tensile behavior of the connections was compared with the non-reinforced material. The results showed that joint strength increased about 91% with increasing the thickness of the face sheet material, whereas increasing the core material thickness decreased the joint strength. The use of carbon fiber-reinforced composite to reinforce the drilled holes in the sandwich samples increased the joint strength 48% for 0.5 mm face sheet used samples. Especially for the thinnest surface material thickness value of 0.5 mm, the increase in bond strength was more pronounced.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sandviç kompozitler havacılık, uzay uygulamaları, denizcilik ve otomobil gibi mühendislik alanlarının hemen hepsinde geniş kullanım alanına sahiptir. Yüksek özgül mukavemet ve yüksek enerji sönümlenme gibi özellikleri sayesinde kullanım alanları giderek artmaktadır [1,2]. Sandviç kompozitler üretilirken rijit ve yüksek mukavemetli yüzey plakalarının arasına daha hafif ve yapısal olarak daha zayıf çekirdek malzemesi yerleştirilir. Yüzey malzemesi olarak genellikle fiber takviyeli kompozit ve Alüminyum (Al) alaşımları tercih edilirken çekirdek malzemesi olarak bal peteği ve köpük en sık kullanılanlardır [3, 4].

Kullanım alanına göre ihtiyaçlara cevap vermesi amacıyla sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri ve tasarım parametreleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Balıkoğlu ve diğ. Yaptıkları çalışmada



denizcilikte kullanılan cam fiber takviyeli kompozit yüzey malzemesine ve polivinil klorid köpük çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozitlerin mekanik performansını araştırmıştır. Numune mukavemetinin artması için kullanılan reçine pimler eğilme mukavemetini arttırmıştır [5]. Baba yaptığı çalışmada kavisli sandviç kompozit malzemelerin darbe davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Kavisli sandviç kompozit numuneler oluşturulurken üç farklı hücre malzemesi kullanılmış ve sonuçlar farklı özelliklerde çekirdek malzemelerinin birlikte kullanılmasının darbe mukavemetini arttırdığı görülmüştür [1]. Çağdaş ve Aliyev köpük çekirdek ve metal yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerde numune boyunun titreşim frekansına etkisini deneysel ve sayısal hesaplamalarla incelemiştir. Sonuçlar artan numune uzunluğunun sönüm oranını azalttığını göstermiştir [6].

Bütün mühendislik yapıları daha küçük malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilir. Bu birleştirme cıvata ve pim kullanılarak mekanik olarak gerçekleştirilebileceği gibi yapıştırıcı kullanılarak da sağlanabilir [7]. Sandviç kompozitlerin düşük mukavemetli çekirdek malzemesi cıvata ve perçinle birleştirilirken istenilen bağlantı mukavemetinin sağlanamamasına sebep olur [8]. Bu nedenle gerçekleştirilen bağlantı mukavemetinin artırılması amacıyla farklı takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Heimbs ve Pein bal peteği sandviç köşe bağlantılarda takviye kullanılmasının bağlantı mukavemetine etkisini araştırmıştır. Mekanik testler kayma testi, eğilme testi şeklinde uygulanmıştır ayrıca cıvatalı bağlantılarda kesme testleri yapılmıştır. Takviye çekme testlerinde çekirdek kayma hasarları takviye malzemesi hasarından önce gelişmiştir [9]. Qi ve diğerleri piramidal kafes çekirdeğe sahip kiriş sandviç kompozitlerin hibrit takviye malzemeleri kullanılarak birleştirilmesini araştırmıştır. Statik çekme test sonuçları numunelerin kayma davranışının belirgin bir biçimde arttığını ve takviye malzemesinin pozisyonunun önemli olduğunu göstermiştir [10]. Cao ve Grenestedt denizcilik uygulamalarında kullanılan sandviç kompozit/çelik bağlantıların tasarım ve test edilmesi üzerine çalışmıştır. Yapıştırıcı ve cıvatanın birlikte kullanıldığı hibrit bağlantı türü ve çelik malzemede delikler açılarak sandviç kompozit ile birlikte kurlleştirilmiş bağlantı türü eğilme ve kayma yüklemesi durumları için karşılaştırılmıştır. İki yükleme türü için de birlikte kurlleştirilmiş bağlantı türü daha yüksek mukavemet sunmuştur. Birlikte kurlleştirme işleminin üretim kolaylığı ve hafifliği de önemli avantajları olarak öne çıkmıştır [11].

Gerçekleştirilen çalışmada Al çekirdek ve karbon fiber takviyeli kompozit yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerin cıvata birleştirilmesi durumunda bağlantı mukavemetinin artırılması amacıyla karbon fiber takviye malzemesi kullanılmıştır. Farklı hücre yüksekliği, delik çapı, yüzey malzemesi kalınlığı ve cıvata sayısı için testler gerçekleştirilmiştir.

## 2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

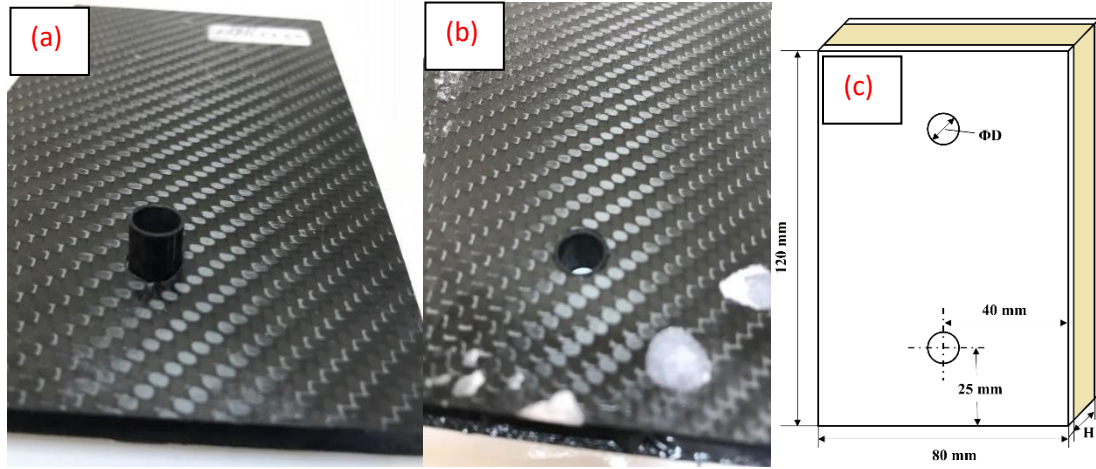
Çekirdek malzemesi olarak Al3003 alaşımından üretilmiş 6.35 mm hücre boyutuna sahip bal peteği kullanılmıştır. Yüzey malzemesi olarak örgü karbon fiber takviyeli kompozit kullanılmıştır. Kullanılan yüzey malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de verilen E1 ve E2 sırasıyla çekme doğrultusunda ve çekme doğrultusuna dik doğrultuda elastisite modülünü,  $\nu_{12}$  poisson oranını ve G12 kayma modülünü tanımlamak için verilmiştir. Bal peteği çekirdek malzemesi ile yüzey malzemesi arasındaki bağlantı epoksi esaslı 3M dP460 yapısal yapıştırıcı ile sağlanmıştır. Kullanılan yapıştırıcı malzemenin elastisite modülü 2077 MPa ve poisson oranı 0.38’dir [12].

**Tablo 1.** Karbon fiber yüzey malzemesinin mekanik özellikleri [13]

Malzeme	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	$\nu_{12}$	G <sub>12</sub> (GPa)
Karbon Fiber Takviyeli Kompozit	83.4	83.5	0.05	6.8

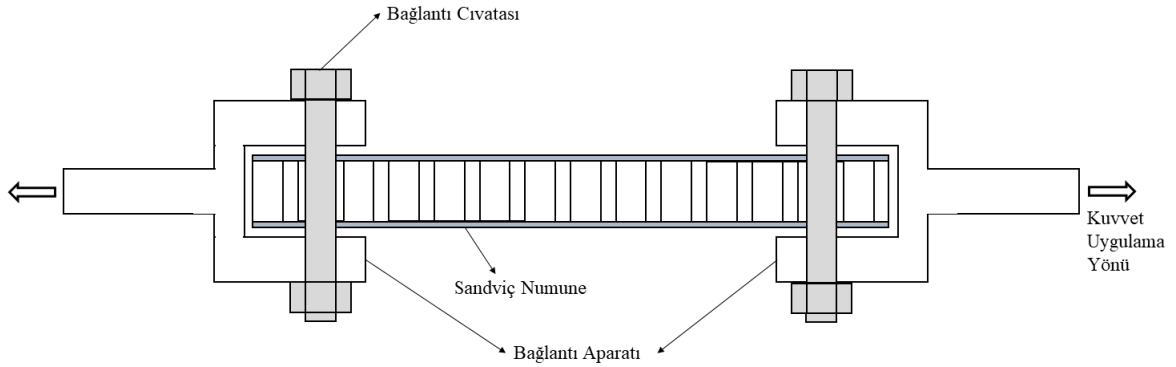
Üretimi tamamlanan sandviç kompozitler 80 mm x 120 mm ölçülerinde kesilmiştir. Bağlantı mukavemetine etkisini incelemek amacıyla 8 mm ve 10 mm olmak üzere iki farklı cıvata delik çapı, 0.5 mm ve 1 mm olmak üzere iki farklı yüzey malzemesi kalınlığı, 10 mm, 15 mm ve 20 mm kalınlığa sahip üç farklı hücre yüksekliği ve bir ve iki olmak üzere iki farklı cıvata sayısına sahip numuneler üretilmiştir. Cıvata sayısına ve delik çapına uygun delikler matkap kullanılarak açılmıştır. Bağlantı mukavemetini arttırmak için

kullanılan karbon fiber takviye malzemeleri açılan deliklere yerleştirilmiş ve 3M DP460 yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Belirlenen ölçüde açılan cıvata deliğine takviye malzemesinin yerleştirilmesi Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 2.** Takviye malzemesi kullanılarak numunelerin hazırlanması (a. Delik açılmış numuneye takviye malzemesinin hizalanması, b. Takviye malzemesinin yapıştırılması sonrası görüntüsü, c. Numune Boyutları)

Hazırlanan takviyeli numuneler ile referans olarak kullanılan takviyesiz numuneler cıvatalardan uygulanan çekme testine tabi tutulmuştur. Şekil 2'de test numunelerine yükün uygulanış şekli verilmiştir.



**Şekil 3.** Test şeması ve test yükünün numunelere uygulanması

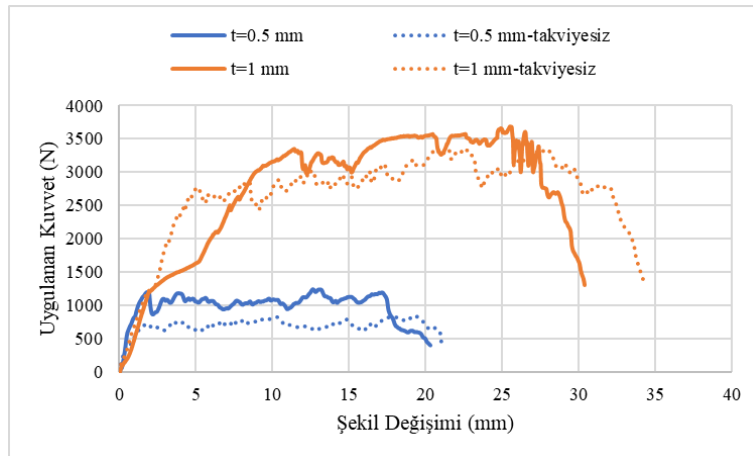
Testler 250 kN yük hücresine sahip Shimadzu marka universal test cihazı ile 1 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Bütün testler 3'er kere tekrarlanmış ve ortalamaları alınarak verilmiştir. Universal test cihazına bağlanmış bir test numunesi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 4. Universal test cihazına bağlanmış iki cıvatalı test numunesi

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

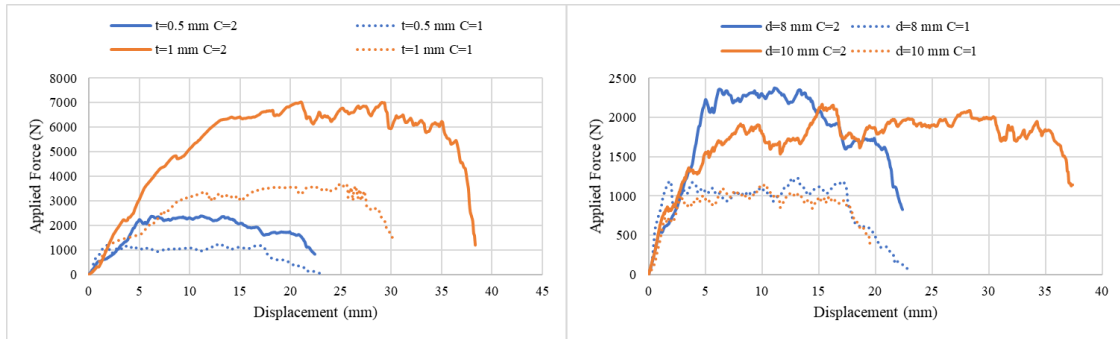
Yüzey malzemesi kalınlığının ve takviye malzemesi kullanılmasının çekme mukavemeti eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Şekildeki değerler 8 mm delik çapına, 10 mm hücre yüksekliğine sahip tek cıvatalı numuneler için verilmiştir. 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip takviyesiz numunenin hasar kuvveti 835.94 N iken takviye malzemesi kullanılan numunenin hasar kuvveti %48 artışla 1234.4 N değerini almıştır. 1 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip takviyesiz numunenin hasar kuvveti 3398.4 N iken takviye malzemesi kullanılması hasar kuvvetini %9 arttırmış ve 3689.8 N hasar yükü tespit edilmiştir. Sandviç kompozit bağlantı çekme yüklemesinde cıvataların iletmediği yükü yüzey malzemesi çekirdek malzemesine nazaran daha fazla miktarda taşır. Yüzey malzemesi kalınlığının artması ortaya çıkan gerilmeyi düşürerek daha fazla yükün taşınmasını sağlayacaktır [14]. Elde edilen sonuçlar bu durumu destekler niteliktedir. Takviye malzemesi kullanılması test numunelerinin ağırlığını arttırmasına karşın numunenin taşıdığı yükte de artış sağlamıştır [15]. Yüzey malzemesi ince olan numunelerde cıvata tarafından iletilen yükün daha az alana etkimesi takviye malzemesi kullanımı ile önlenmiştir. Bu sayede takviye malzemesi kullanılan ince yüzey malzemesine sahip numunelerde hasar yükü artışı daha fazla olmuştur.



Şekil 5. Takviye malzemesi kullanılmasının numunelerin uygulanan kuvvet – şekil değişimi grafiğine etkisi

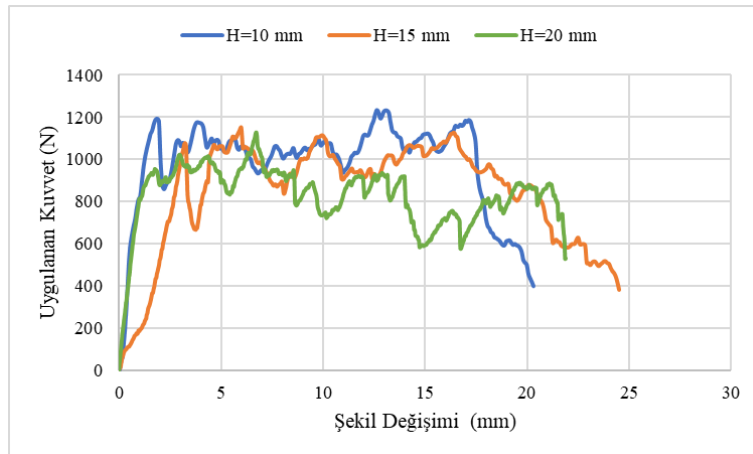
Bağlantıları oluşturmak için kullanılan cıvata sayısının yüzey malzemesi kalınlığı ve delik çapı ile birlikte hasar yüküne etkisi 10 mm hücre yüksekliğine sahip numuneler için Şekil 5'te verilmiştir. 0.5 mm yüzey malzemesine sahip tek cıvatalı modelin hasar yükü 1234.4 N iken bağlantının iki cıvata ile gerçekleştirilmesi durumunda hasar yükü 2376.6 N olarak tespit edilmiştir. Yüzey malzemesi kalınlığının 1 mm olduğu numunelerde tek cıvatalı modelin hasar yükü 3689.8 N iken iki cıvatalı modelin hasar yükü % 91 artışla 7041.4 N olmuştur. 8 mm delik çapına sahip numune için cıvata sayısının birden ikiye çıkarılması hasar yükünde %93 artışa sebep olmuştur. 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığı için delik çapının 10 mm olduğu numunelerden tek cıvata ile birleştirilen numunenin hasar yükü 1148.4 N olarak belirlenirken cıvata sayısının ikiye çıkarılması hasar yükünü %89 arttırmış ve 2165.6 N değerini almıştır.

Bağlantı mukavemetini arttırmak için kullanılan cıvata sayısını arttırmak tercih edilen yöntemlerden biridir. Numune genişliğinin yeterli olduğu numunelerde paralel cıvatalar tercih edilir [14, 15]. Numune genişliği yeterli olmayan numuneler için çoklu cıvata uygulamaları seri yerleşim şeklinde seçilmektedir [18]. Gerçekleştirilen çalışmada iki cıvata kullanılan numunelerin daha fazla yük taşıması literatürle uyum göstermektedir.



**Şekil 6.** Cıvata sayısının çekme davranışına etkisi (a. Yüzey malzemesi kalınlığı ile cıvata sayısı ilişkisi b. Delik çapı ile cıvata sayısı ilişkisi)

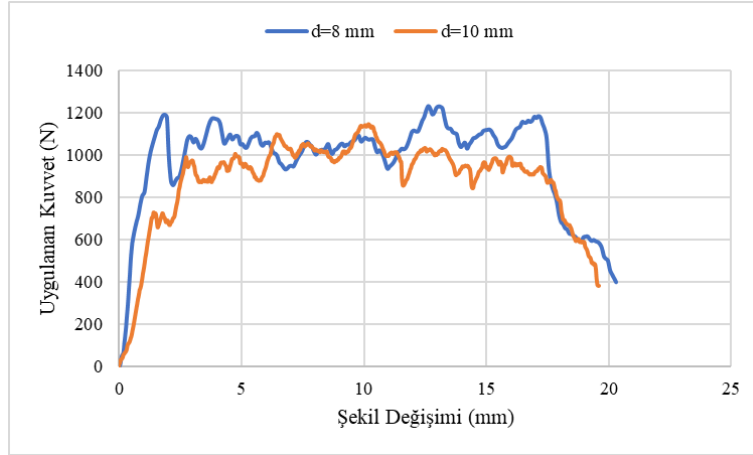
Şekil 6'da hücre yüksekliğinin 8 mm çapına delik içeren numunelerin uygulanan kuvvet – şekil değişimi davranışına etkisi verilmiştir. Hücre yüksekliğinin artması numune hasar yükünün düşmesine sebep olmuştur. 10 mm hücre yüksekliğine sahip numunenin hasar yükü 1234.4 N, 15 mm hücre yüksekliğine sahip numunenin hasar yükü 1151.6 N ve 20 mm hücre yüksekliğine sahip numunenin hasar yükü 1129.7 N değerini almıştır.



**Şekil 7.** Hücre yüksekliğinin uygulanan kuvvet – şekil değişimi davranışına etkisi

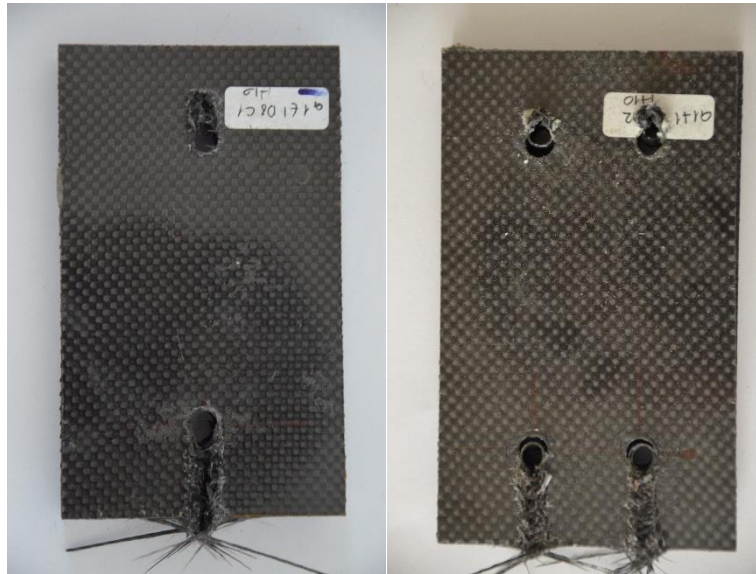
10 mm hücre yüksekliği, 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip tek cıvata içeren numunelerde delik çapının karbon fiber takviye malzemesi içeren numunelerin hasar yüküne etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Delik çapının artması numune hasar yükünü düşürmüştür. 8 mm çapında delik içeren numune için 1234.4 N

olarak belirlenen hasar yükü delik çapının 10 mm'ye çıkması durumunda %7.5 düşükle 1148.4 N değerini almıştır.



**Şekil 8.** Delik çapının uygulanan kuvvet – şekil değişimi davranışı

Şekil 8’de tek ve iki cıvata ile birleştirilmiş numunelerin çekme testi sonrası hasara uğramış görüntüleri yer almaktadır. Belirlenen parametrelere göre üretilen numunelerin tamamında görülen hasar tipi kayma hasarı şeklindedir. Tek ve iki cıvatalı modellerin ikisinde de karbon fiber takviye malzemeleri çekme yükünün uygulandığı yönde hasara uğramıştır. Numunelerin hiçbirinde çekme hasarı, yataklama hasarı ve cıvata hasarı görülmemiştir. Numunelerde meydana gelen hasar tipini belirleyen temel etken bağlantı tasarımıdır. Hazırlanan numunelerde çekme yönüne paralel serbest kenar ile cıvata deliği merkezi arasındaki mesafenin fazla olması hasar tipinin kayma hasarı şeklinde ortaya çıkmasına sebep olmuştur [19].



**Şekil 9.** 1 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip takviye malzemesi kullanılan numunelerin hasar sonrası görüntüsü (a. Bir cıvatalı model b. İki cıvatalı model)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Gerçekleştirilen çalışmada Al 3003 bal peteği ve karbon fiber yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerin cıvata ile birleştirilmesi durumunda yüzey malzemesi kalınlığı, cıvata çapı, cıvata sayısı, çekirdek malzemesi yüksekliği ve cıvata deliklerinin karbon fiber takviye malzemesi ile güçlendirilmesinin bağlantı mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Karbon fiber takviye malzemesi kullanılması durumunda en yüksek mukavemet artışı %91 ile 0.5 mm kalınlığında yüzey malzemesi kullanılan numunelerde görülmüştür.
- Bağlantının bir cıvata yerine iki cıvata ile gerçekleştirilmesi durumunda 8 mm cıvata kullanılan numunelerde %93, 10 mm cıvata kullanılan numunelerde %89 mukavemet artışı değerleri tespit edilmiştir.
- Hücre yüksekliğinin 10 mm'den 15 mm ve 20 mm'ye çıkması bağlantı mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur.
- Bağlantı için kullanılan cıvata çapının artması tek cıvatalı numunelerde bağlantı mukavemetinin %7, iki cıvatalı numunelerde bağlantı mukavemetinin %9 düşmesine sebep olmuştur.
- Test edilen bütün numunelerde kayma hasarı meydana gelmiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. O. Baba, "Curved sandwich composites with layer-wise graded cores under impact loads," *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.054.
- [2] A. Quispitupa, C. Berggreen, and L. A. Carlsson, "Face/core interface fracture characterization of mixed mode bending sandwich specimens," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 34, no. 11, pp. 839–853, 2011, doi: 10.1111/j.1460-2695.2011.01551.x.
- [3] F. P. Yang, Q. Y. Lin, and J. J. Jiang, "Experimental study on fatigue failure and damage of sandwich structure with PMI foam core," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 38, no. 4, pp. 456–465, 2015, doi: 10.1111/ffe.12246.
- [4] M. Aslan, O. Güler, and Ü. Alver, "The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 1062–1068, 2018, doi: 10.5505/pajes.2018.37605.
- [5] F. Balıkoğlu, T. K. Demircioğlu, M. Yıldız, N. Arslan, and A. Ataş, "Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 2030–2048, 2020, doi: 10.1177/1099636218792671.
- [6] İ. U. Çağdaş and R. Aliyev, "Metal Yüzlü Sandviç Konsol Kirişlerde Numune Boyunun Ölçülen Temel Titreşim Frekansına Etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 237–244, 2020, doi: 10.29109/gujsc.591724.
- [7] M. Y. Solmaz and T. Topkaya, "Progressive failure analysis in adhesively, riveted, and hybrid bonded double-lap joints," *J. Adhes.*, vol. 89, no. 11, 2013, doi: 10.1080/00218464.2013.765800.
- [8] K. Il Song, J. Y. Choi, J. H. Kweon, J. H. Choi, and K. S. Kim, "An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 107–113, 2008, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.027.
- [9] S. Heimbs and M. Pein, "Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts," *Compos. Struct.*, vol. 89, no. 4, pp. 575–588, 2009, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.11.013.
- [10] G. Qi, Y. L. Chen, P. Richert, L. Ma, and K. U. Schröder, "A hybrid joining insert for sandwich panels with pyramidal lattice truss cores," *Compos. Struct.*, vol. 241, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112123.
- [11] J. Cao and J. L. Grenestedt, "Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 9, pp. 1091–1105, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.02.010.

- [12] S. Akpınar, M. D. Aydın, Ş. Temiz, and A. Özel, “3-D non-linear stress analysis on the adhesively bonded T-joints with embedded supports,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 53, pp. 314–323, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.049.
- [13] T. Topkaya and M. Y. Solmaz, “Investigation of low velocity impact behaviors of honeycomb sandwich composites,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 3161–3167, 2018, doi: 10.1007/s12206-018-0619-5.
- [14] P. Lopez-Cruz, J. Laliberté, and L. Lessard, “Investigation of bolted/bonded composite joint behaviour using design of experiments,” *Compos. Struct.*, vol. 170, pp. 192–201, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.02.084.
- [15] J. W. Lim and D. G. Lee, “Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 8, pp. 1040–1048, 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.04.008.
- [16] M. Attar, S. M. Ahmadpour, S. S. Banisadr, A. Mohammadi, S. Z. Mirmoradi, and Z. Shirazi, “The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano additions on failure of GFRP plate with two parallel pin loaded holes,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 6, pp. 2769–2776, 2019, doi: 10.1007/s12206-019-0523-7.
- [17] A. Ataş, N. Arslan, and F. Sen, “Failure analysis of laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 28, no. 10, pp. 1265–1276, 2009, doi: 10.1177/0731684408089493.
- [18] R. Karakuzu, C. R. Çalışkan, M. Aktaş, and B. M. İçten, “Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin-loaded holes,” *Compos. Struct.*, vol. 82, no. 2, pp. 225–234, 2008, doi: 10.1016/j.compstruct.2007.01.002.
- [19] F. Gamdani, R. Boukhili, and A. Vadean, “Tensile behavior of hybrid multi-bolted/bonded joints in composite laminates,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 95, no. August, p. 102426, 2019, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102426.

# Impedance Analysis and Variable Capacity Array Application for Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances

 Fatih ISSI<sup>1,\*</sup>  Orhan KAPLAN<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Cankiri Karatekin University, Vocational High School, Department of Electronics and Automation, ,18100, Tasmescit/CANKIRI

<sup>2</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

## Graphical/Tabular Abstract

In this study, impedance analysis and variable capacitor array application of Magnetic Resonance Coupled Wireless Energy Transfer (MRWPT) systems have been performed. Wireless energy transmission (WPT) system with Series-Series topology was analyzed and the effect of variable mutual inductance value on the input impedance of the system was modeled. The capacitor array was designed to ensure that the input impedance was equal to the load impedance. An algorithm has been proposed for the control of the capacitor array.

## Article Info:

Research article

Received: 29/10/2020

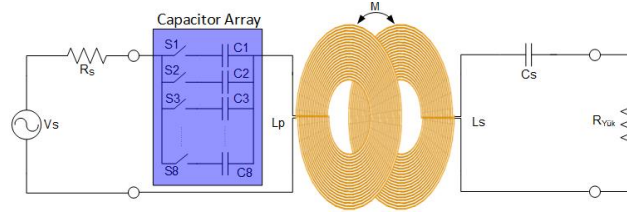
Revision: 08/12/2020

Accepted: 08/12/2020

## Highlights

- WPT Topologies
- Capacitor Array
- Matlab-Simulink

## Keywords

 Wireless Power Transfer  
 Mutual Inductance  
 Capacitor Array


**Figure A.** Circuit schema of variable array application of designed WPT

**Purpose:** In the WPT systems, when the distance between the coils varies, mutual inductance changes. Variation of mutual inductance affects the input impedance of the MRWPT system. In order to eliminate the negative influence of mutual inductance on input impedance, the capacity value should be changed. The purpose of this study is to provide the equality between input impedance and load impedance when the changing of transceiver coils distance.

**Theory and Methods:** Input impedance analysis of the WPT system was performed using the SIMULINK. An algorithm was developed to calculate the mutual inductance used in the model. In addition, another algorithm was found to provide the capacity value of the resonance system requirement. The capacity value was realized in the application of the capacity array designed by prepared control algorithm. Actual values of the capacities used in the series were used, and the effect of capacity tolerances was included in the study.

**Results:** The WPT model has been investigated for four different scenarios. In the first scenario, it is seen that input impedance and load resistance are equal at a distance  $d=5.5\text{cm}$  and  $d=29\text{cm}$ . In the second and third scenarios, it is seen that the distance values at where the transmission power will be higher by increasing the capacity value are approximately  $d=8\text{cm}$  and  $d=21.9\text{cm}$ ,  $d=10.6\text{cm}$  and  $d=18.2\text{cm}$ . In the fourth scenario, it is observed that the input and output impedance do not match at all and the amount of power transferred will be lower than the other scenarios.

**Conclusion:** In MRWPT systems, the changing of the distance between transmitter and receiver coils affects the power transmission. In this study, the effect of the series capacity value used in order to keep power transfer between the coils high on the system input impedance was examined on the model. In the model, effect of distance change on the input impedance was analyzed by using the capacitors label values. Then, a flexible variable capacitance matrix performed from 8 capacitors and their all combination values that can be created by the series-parallel connection of capacitors were measured. In this way, the obtained real capacitance values were used instead of the previously used capacitance values in the developed model and the distance-dependent values of the input impedance were calculated. It has been shown that in wireless energy transfer systems where the distance between the transmitter and receiver coils varies under certain limits, the input and output impedance equality and thus the maximum power transfer can continue.



GU J Sci, Part C, 8(4): 1005-1020 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Manyetik Rezonans Kuplajlı Kablosuz Enerji Transfer Sistemi için Empedans Analizi ve Değişken Kapasite Dizisi Uygulaması

Fatih ISSI<sup>1,\*</sup> Orhan KAPLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 18100, Taşmescit/ÇANKIRI

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Seri-Seri manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemlerinde alıcı-verici bobinler arası mesafenin değişmesi sistemin giriş empedansını ve dolayısıyla güç aktarımını etkileyen önemli problemlerden biridir. Bu çalışmada, manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji transfer sistemlerinde alıcı-verici bobinler arası mesafenin değişmesi durumunda maksimum güç aktarımının sürdürülebilmesi için sisteme ilave edilen seri kapasite kullanımının etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında alıcı-verici bobinler arası mesafenin 0–30 cm sınırları arasında değiştirildiğinde maksimum güç aktarımının yapılabilmesi için gerekli kapasite değeri ve bu değere göre sistemin giriş empedansı hesaplanmıştır. Buna ilaveten sekiz tane kondansatör ve röleler kullanılarak kapasite matrisi uygulaması gerçekleştirilmiş ve bu devrede her bir kapasitenin gerçek değeri ölçülmüştür. Kapasitörlerin etiket değerleri kullanılarak yapılan benzetim sisteminde, alıcı – verici bobinler arası değişimin giriş empedansı ve güç aktarımı üzerindeki etkisi ölçülen gerçek kapasite değerleriyle tekrar incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, giriş empedansının mesafeye ve dolayısıyla alıcı – verici bobinler arası ortak endüktansa bağlı olarak değişiminin analiz edilebildiği bir model geliştirilmiştir. Modelde, kullanılan kapasitelerin etiket değerleri yerine gerçek değerlerinin kullanılmasının gerekliliği vurgulanmıştır ve gerçek değerlerle oluşturulan değişken kapasite dizisinden gerekli en uygun topolojiyi belirleyen bir algoritma önerilmiştir. Alıcı-verici bobinler arası mesafenin belirli sınırlar arasında değiştiği kablosuz enerji aktarım sistemlerinde giriş ve çıkış empedans eşitliğinin ve böylece maksimum güç aktarımının devam edebileceği gösterilmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 29/10/2020  
Düzeltilme: 08/12/2020  
Kabul: 08/12/2020

### Anahtar Kelimeler

*Kablosuz Enerji Aktarımı*  
*Karşılıklı Endüktans*  
*Kapasitör Dizisi*

### Keywords

*Wireless Power Transfer*  
*Mutual Inductance*  
*Capacitor Array*

## Impedance Analysis and Variable Capacity Array Application for Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances

### Abstract

In serial-series wireless energy transfer system via coupled magnetic resonances systems, the change of distance between the transmitter and receiver coils is one of the most important problems affecting the input impedance of the system and thus the power transfer. In this study, the effect of the use of serial capacity added to the system in order to maintain the maximum power transfer in case of changing the distance between the transceiver coils in wireless energy-transfer system via coupled magnetic systems was investigated. In the simulation studies, when the distance between the transceiver coils was changed between 0 and 30 cm limits, the required capacity value for the maximum power transfer and the input impedance of the system according to this value was calculated. In addition, a capacity matrix application using eight capacitors and relays was realized, and the actual value of each capacity was measured for the circuit. In the simulation system made by using the label values of the capacitors, the effect of the change between the transceiver coils on the input impedance and power transfer was examined again with the measured real capacitance values. At the end of the study, a model has been developed in which the change of input impedance depending on the distance and therefore the common inductance between the transceiver coils can be analyzed. It has been shown that in wireless energy transfer systems where the distance between the transmitter and receiver coils varies between certain limits, the input and output impedance equality and thus the maximum power transfer can continue.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kablosuz enerji transferi sistemleri üzerine yapılan çalışmalar ilk kez 1900'lü yılların başında Nikola Tesla tarafından enerjinin manyetik alan kullanılarak karşılıklı bobinler vasıtasıyla aktarılmasıyla ortaya çıkmıştır [1-3]. Fiziksel temasın ortadan kaldırılması, kaynak ile yük arasında hava boşluğundan enerjinin aktarılabilmesi ve daha esnek kullanımın sağlanması, kablosuz güç aktarımının elektrikli araçlar, medikal ve taşınabilir kişisel cihazların şarj edilmesi gibi birçok alanda kullanımına olanak vermektedir [3-19].

Literatürde kablosuz enerji aktarımı için geliştirilen çeşitli yöntemler bulunmasına rağmen elektromanyetik indüksiyon ve mikrodalga prensibi kullanılarak yapılan güç transferi en popüler yöntemler olarak öne çıkmaktadır [20]. Gündelik hayatta kullandığımız diş fırçası ve cep telefonu gibi cihazlarda da yaygın olarak tercih edilen elektromanyetik indüksiyon prensibi alıcı-verici bobinler arası mesafenin birkaç cm ile sınırlandırıldığı sistemlerde yüksek verim ve güç aktarımı performansı sağlamaktadır. Ancak bobinler arası mesafe artırıldığında güç transferi ve verim etkinliği neredeyse tamamen kaybolmaktadır. 2007 yılında Andre Kurs ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya kadar kablosuz enerji transferinin gelişiminde en önemli engel bobinler arası mesafenin artmasıydı. Yapılan çalışmada orta mesafede yüksek verimle güç aktarımı için manyetik rezonans kuplajlı enerji aktarım sistemi gösterilmiştir [16]. İki rezonatör bobin kullanılarak manyetik kuplaj sağlanmış, 60W güç, 2m mesafeye yaklaşık olarak %40 verimle aktarılmıştır. Bu çalışmadan sonra kablosuz güç aktarım çalışmalarında yeni kontrol yöntemleri kullanılarak verimin artırılması, aktarılan güç ve aktarım mesafesinin yükseltilmesi ve fiziksel olarak en uygun devre tasarımının gerçekleştirilebilmesi hedeflenen birçok çalışma yapılmıştır [6, 15, 22-24].

Alıcı – verici bobinler arası belirli bir mesafede yüksek çalışma performansı için tasarlanan manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarımında, mesafesinin değişmesiyle bobinlerin kaçak endüktans ve karşılıklı endüktans değerleri değişmektedir. Literatürde sistemin güç aktarım performansını olumsuz etkileyen bu değişimin etkisini ortadan kaldırabilmek için, ayarlı kapasitör veya bobinler arası belirlenen mesafe aralığı için sabit kapasitörlerin kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır [29-31]. Bunlara ilaveten karşılıklı endüktansın ayarlanabildiği dört bobinli sistemler de bulunmaktadır [29, 30]. Fakat bu sistemlerde yine sabit bir mesafe için güç iyileştirilmesi yapılabilmektedir. Kablosuz enerji aktarım sistemlerinde bobinler arası mesafenin değişmesi durumunda sistemin çalışma frekansının değiştirilerek rezonans şartı ve güç aktarımının artırılması bir diğer çözüm yoludur [25]. Frekans ayarlama teknikleri kullanılarak aktarılan güç artırılmış, bu yöntemde frekans bant aralığı sistemin çalıştırılma frekansının birkaç kHz yakınında tutulmuştur. Fakat, mesafeye bağlı olarak değişen karşılıklı endüktanstaki büyük değişimler için rezonans şartı sağlanamamasından dolayı çalışma sınırları kısıtlı kalmıştır [15, 17, 26]. Frekansın ve aktarım mesafesinin sabit tutulduğu, alıcı bobine bağlı yükün değiştiği durumda veriminin yükseltilmesi için yapılan çalışmalarda ise, sabit kapasitör kullanılarak sistemin rezonans şartı sağlanmıştır [16, 27]. Ancak bu çalışmalarda aktarım mesafesi sabit kabul edilmiş, aktarım mesafesinin değişmesi halinde aktarım gücünün doğrudan etkilendiği göz ardı edilmiştir [28].

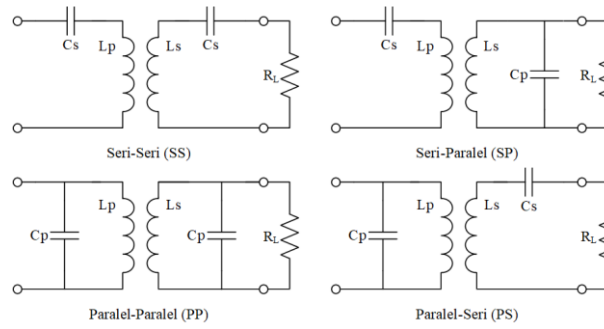
Bu çalışmada, seri kompanzasyonlu manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemi için, değişken kapasitör dizisi uygulamasının analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin maksimum güç aktarımını sürdürebilmesi için giriş empedansının değişimi incelenmiştir. Sistemde alıcı–verici bobinler arası mesafenin değişimi durumunda, karşılıklı endüktanstaki değişim buna bağlı olarak verici devreye yansıyan empedansın giriş empedansına olan etkisinin ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Matlab/Simulink araç kutusu kullanılarak bir model geliştirilmiş ve bu modelde istenilen mesafe aralığında karşılıklı endüktans analizi yapılarak, sistemin giriş empedansı hesaplanmış ve rezonans şartını sağlayan kapasite değeri elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında alıcı – verici bobinler arası mesafenin 0,1cm değişiminin etkisini yok etmek için tasarlanan 0,1nF adım değerli seri kapasitör devresinin kompanzasyon etkisi analiz edilmiştir. Bu sayede, sistemin karşılıklı endüktansa bağlı olarak değişen yansıyan empedansı analiz edilmiş ve sistemin en yüksek güç aktarımını yapabildiği seri kapasite değeri bulunmuştur. Bulunan kapasite değeri, önerilen algoritma yardımı ile sayısal işaret işleyici (DSP) tarafından kontrol edilen kapasitör dizisi kullanılarak sistemin verici devresine uygulanmıştır. Sistemde kullanılan kapasitörlerin gerçek değerleri 100kHz frekans uygulanarak ölçülmüş ve uygulama sonucunda kapasite toleranslarının etkisi en aza indirilmiştir.

Çalışmanın diğer bölümlerinde sırasıyla şunlar anlatılmaktadır. İkinci bölümde manyetik rezonans kuplajlı seri-seri kablosuz enerji aktarım sisteminde karşılıklı endüktans ve yansıyan empedansın giriş empedansına

etkisini analiz etmek amacıyla matematiksel model çıkarılmıştır. Üçüncü bölümde karşılıklı endüktans değerinin farklı mesafelerde giriş empedansına olan etkisini incelemek amacıyla bir kablosuz enerji aktarım sistemi benzetimi sunulmuştur. Benzetimde geliştirilen bir algoritma yardımıyla, giriş empedansı analiz edilmiş, maksimum güç aktarımı yapılabilmesi için gerekli seri kapasite değerinin bulunması sağlanmıştır. Dördüncü bölümde ise, gerçek bir uygulamada kapasite değerinin etiket değeri ve gerçek değeri arasındaki küçük farkın giriş empedansı ve aktarım mesafesi üzerine etkisi ele alınarak seri bir kapasite dizisi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

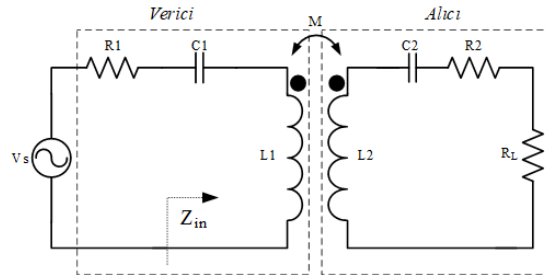
## 2. MANYETİK REZONANS KUPLAJLI SERİ-SERİ KABLOSUZ ENERJİ AKTARIM SİSTEMİ MODELİ (SERIES-SERIES WIRELESS POWER SYSTEM MODEL)

Manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemlerinde seri-seri, seri-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel olmak üzere Şekil 1’de verilen 4 farklı devre topolojisi kullanılmaktadır [32, 33].

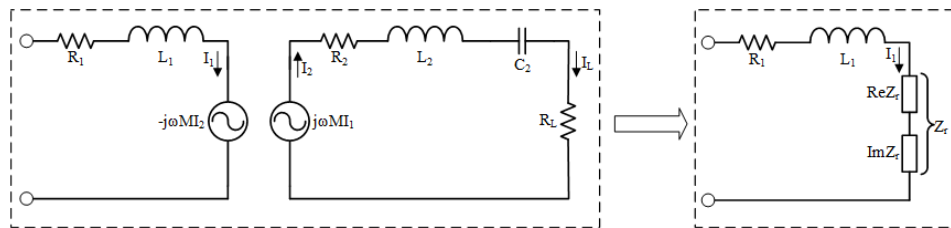


Şekil 1. Kablosuz enerji aktarım sistemi topolojileri

Verici devrenin seri topolojide olması bobinden yüksek akım geçmesini, dolayısıyla alıcı devreye aktarılan gücün yüksek olmasını sağlamaktadır. Verici devrenin, paralel topolojide olması rezonans devresinin açık devre olması nedeni ile verici bobinden çok az akım geçmesine neden olmakta, alıcı devreye çok az güç aktarılmasına izin vermektedir. Alıcı devrenin seri yapıda olması düşük empedanslı yükler için uygun, yüksek yük empedansı için uygun değildir. Yük empedansı dikkatli seçildiğinde ve rezonans sağlandığında, aktarım gücü ve verim en yüksek değerde olmaktadır [35]. Bu çalışmada kullanılan seri-seri devre topolojisi Şekil 2’de verilmiştir. Burada,  $Z_{in}$  devrenin giriş empedansını,  $L_1$  verici bobinin endüktansını,  $R_1$  verici bobinin direncini,  $C_1$  verici devresi rezonans kapasitörünü göstermektedir. Aynı şekilde,  $L_2$  alıcı bobinin endüktansını,  $R_2$  alıcı bobinin direncini,  $C_2$  alıcı devresi rezonans kapasitörünü ifade etmektedir.



Şekil 2. Seri-Seri kablosuz enerji aktarım sistemi topolojisi



Şekil 3. Seri-Seri kablosuz enerji aktarım sistemi eşdeğer devresi

Sistemde alıcı devrenin, verici devreye yansıyan empedansı  $Z_r$ , eşdeğer devrenin sadeleştirilmesiyle bulunabilir. Şekil 3'te yansıyan empedans eşdeğer devresi sunulmuştur. Yansıyan empedans alıcı devrenin toplam empedansının, verici devreye etkisini kapsamakta ve sistemin giriş empedansını doğrudan değiştirmektedir. Bu değişim, alıcı devre elemanlarının sabit kabul edildiği durumda sadece bobinler arası karşılıklı endüktans değerine bağlı olmaktadır. Yük empedansının değişken olduğu durumlarda da bu etki yüke bağlı olarak değişmektedir. Yansıyan empedans Eşitlik 1 kullanılarak bulunmaktadır.

$$Z_r = \frac{\omega_o^2 M^2}{R_2 + R_L + j\omega_o L_2} \quad 1$$

Eşitlikte  $\omega_o$  sistemin çalışma frekansını,  $M$  karşılıklı endüktansı,  $R_2$  alıcı bobin direncini,  $L_2$  alıcı bobin endüktansını,  $R_L$  yük direncini ifade etmektedir. Eşitlikte de görüldüğü gibi alıcı devrenin empedansı ve yük direnci yansıyan empedansa etki etmektedir. Aktarım gücünün yüksek olabilmesi için verici devre empedansı ile yansıyan empedans birbirine eşit olmalıdır [39].

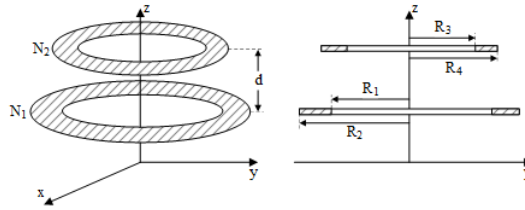
Kablosuz enerji aktarım sisteminin güç aktarım kapasitesi, alıcı kısmın rezonans frekansına bağlıdır [33]. Bu frekansta sistemin çalıştırılması alıcı kısmın omik davranış sergilemesini sağlamaktadır. Burada alıcı kısmın rezonans şartı Eşitlik 2' de ifade edilmektedir.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{C_2(L_2 + M)}} \quad 2$$

Eşitlikte,  $\omega_r$  alıcı devrenin rezonans frekansını,  $L_2$  alıcı bobine ait öz endüktansı,  $C_2$  alıcı devre kapasitesini ve  $M$  ise iki bobin arasında oluşan karşılıklı endüktansı ifade etmektedir. Karşılıklı endüktansın değişiminin alıcı kısmın rezonans şartını doğrudan etkilediği eşitlikte görülmektedir. Sistemin aktarım verimi, alıcı devre yük empedansı ile eşdeğer devre empedansı oranı ile elde edilebilir [36]. Eşitlik 3 seri-seri kablosuz enerji aktarım sistemlerinde verimi göstermektedir.

$$\eta = \frac{R_L}{(R_L + R_2) \left(1 + \frac{R_1(R_2 + R_L)}{\omega_o^2 M^2}\right)} \quad 3$$

Sistemin giriş empedansını etkileyen diğer önemli parametre olan karşılıklı endüktans değeri, Şekil 4'te görülen, aynı düzlemde birbirine paralel dairesel disk bobinler için Eşitlik 4'te verilen ifadeyle hesaplanabilmektedir [34].



Şekil 4. Eksenleri hizalanmış paralel dairesel bobinlerin yerleşimi

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)} \int_0^\pi \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_3}^{R_4} \frac{\cos \theta r_1 r_{II}}{r} dr_1 dr_{II} d\theta \quad 4$$

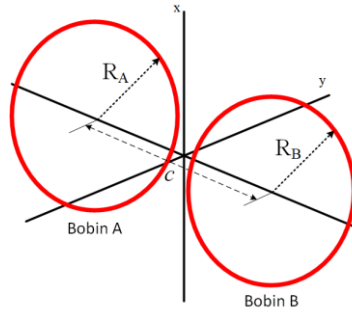
Eşitlikte,  $N_1$  ve  $N_2$  bobinlere ait tur sayılarını,  $R_2$  ve  $R_4$  bobinlerin dış yarıçaplarını,  $R_1$  ve  $R_3$  iç yarıçaplarını belirtmektedir. Mesafe ve bobinlerin yerleşimi Eşitlik 5'te verilen kosinüs teoremiyle bulunmaktadır.

$$r = \sqrt{d^2 + (R_2 - R_1)^2 - 2(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)\cos\theta + (R_4 - R_3)^2} \quad 5$$

Buradan yola çıkarak, Şekil 45'te gösterilen merkezleri hizalanmış iki dairesel telin (Maxwell bobini) karşılıklı endüktans değeri Eşitlik 6 kullanılarak nümerik olarak hesaplanabilir [37].

$$M_{12} = \frac{2\mu_0 \sqrt{R_A R_B}}{k} \left[ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right] \quad 6$$

$$k^2 = \frac{4R_A R_B}{(R_A R_B)^2 + c^2} \quad 7$$



Şekil 5. Maxwell bobini

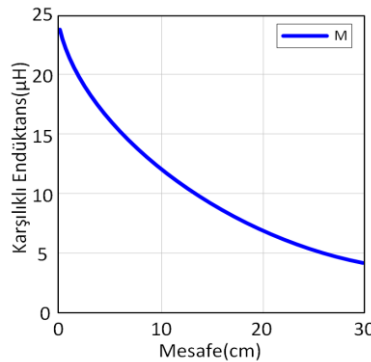
Eşitlik 6, tam eliptik integral çözümünü olup  $K$  ve  $E$  integralin birinci ve ikinci terimini oluşturmaktadır. Fonksiyon parametresi  $k$  (Eşitlik 7), dairesel tellerin yarıçapları  $R_A$  ve  $R_B$ , teller arası mesafe aralığı  $c$  kullanılarak karşılıklı endüktans değeri bulunabilir. Hesaplama dairesel şekildeki iki bobin  $(2N + 1) \times (2n + 1)$  hücreye bölünerek, her bir hücre bir teli oluşturmaktadır [34]. Hücreler kümülatif olarak hesaplanarak, karşılıklı endüktans değeri toplamda elde edilmektedir. Tanımlanan bu bobinler arasındaki karşılıklı endüktans Eşitlik 8'de belirtilmektedir.

$$M_0 = \frac{N_1 N_2}{(2N+1)(2n+1)} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{l=-n}^{l=n} M(h, l) \quad 8$$

Eşitlikte,  $N$  ve  $n$  bobinlerin hücre sayılarını,  $h$  ve  $l$  çözüm adım değerini göstermektedir. Şekil 2'de eşdeğer devre modeli gösterilen manyetik rezonans kuplajlı seri-seri kablosuz enerji aktarım sistemi için giriş empedansı Eşitlik 9'da ifade edilmiştir.

$$Z_{in} = j(\omega_s L_1 - \frac{1}{\omega_s C_1}) + \frac{\omega_s^2 M^2}{(\frac{8}{\pi^2}) R_L + j(\omega_s L_2 - \frac{1}{\omega_s C_2})} \quad 9$$

Maksimum güç aktarımının yapılabilmesi için sistemin giriş ve çıkış empedanslarını birbirine eşit olması gereklidir [25,37]. Giriş empedansını doğrudan etkileyen değişkenler frekans ve karşılıklı endüktans değeridir. Sistemin çalışması sırasında topolojik olarak yapılacak değişiklikler de yine giriş empedansını doğrudan etkileyecektir. Bu çalışmada frekansın sabit olarak tutulması sebebiyle giriş empedansı değerini, karşılıklı endüktans ve sistem topolojisinde kullanılan elemanlar belirlemektedir. Giriş empedansı, alıcı-verici bobinler arası mesafeyle karşılıklı endüktansa bağlı olarak değişmektedir. Karşılıklı endüktansın bobinler arasındaki mesafeye göre değişimi Eşitlik 4'e göre bulunabilmektedir. Bu çalışmada eşitlikler geliştirilen bir MATLAB fonksiyonuyla hesaplanmış ve elde edilen değerlerin doğruluğu ANSYS Maxwell programı kullanılarak oluşturulan modelde kanıtlanmıştır. Sistemin anahtarlama frekansının, alıcı-verici bobinlere ait endüktansların ve kapasitelerin sabit olduğu durumda, karşılıklı endüktansın mesafeye bağlı değişimi Şekil 6'da gösterildiği gibi olmaktadır.



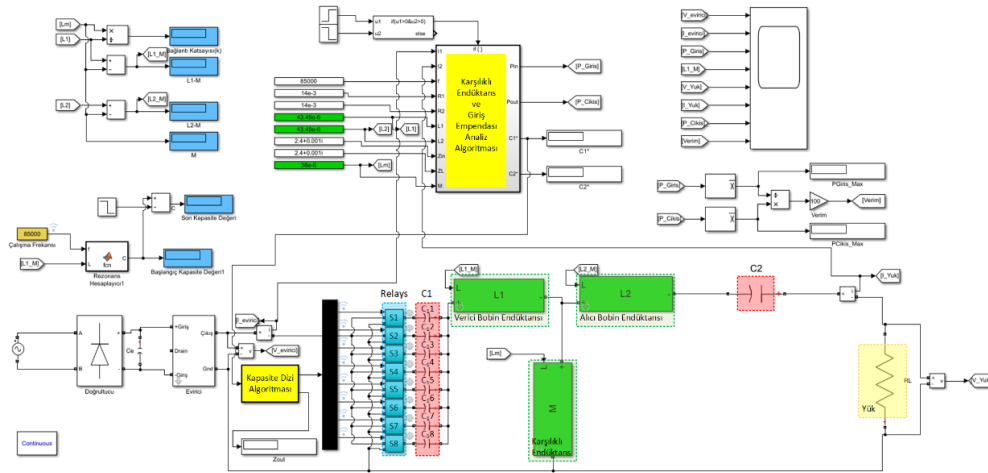
Şekil 6. Alıcı – verici bobinler arası mesafeyle karşılıklı endüktans değişimi

Bobinler arasındaki mesafe arttıkça karşılıklı endüktans azalmaktadır [28]. Buna bağlı olarak verici devrenin empedansı değişmekte, sistemin rezonans frekansı da kaymaktadır. Önceki çalışmalarda bu

durumun telafi edilmesi için anahtarlama frekansının veya sistemde verici bobinde bulunan kapasite değerinin değiştirilmesi önerilmiştir [16-18,26,27,30-32]. Frekans ayarlama aralığının sınırlı kalması nedeniyle devrede topolojik olarak kapasitenin yeniden ayarlanması uygulanabilirliği kolay bir çözümdür.

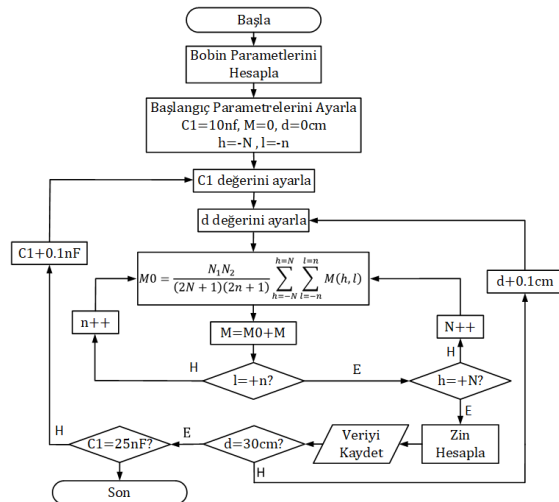
### 3. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Sistemin empedans hesaplamalarını ve karşılıklı endüktansın mesafeye göre değişiminin analizini yapabilmek amacıyla Şekil 7’de gösterilen Matlab/Simulink modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, istenilen mesafe aralığında karşılıklı endüktans analizini yaparak, sistemin giriş empedansını ve rezonans şartını sağlayan kapasite değerini hesaplamaktadır. Böylelikle bulunan kapasite değerinde aktarım gücü ve verim kolaylıkla yorumlanabilmektedir. Bu bölümde geliştirilen model kapasitelerin etiket değerleri kullanılarak açıklanmıştır. Sonraki bölümde ise benzetimi yapılan kapasite dizisi uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Empedans analizi ve karşılıklı endüktans SIMULINK modeli

Model seri-seri kablosuz enerji aktarım sistemi eşdeğeri ve hesaplama bloklarından oluşmaktadır. Eşdeğer devrede, kaynak gerilimi doğrultulmuş, evirici bloğu kullanılarak yüksek frekanslı gerilim üretilmiştir. Evirici çıkışında paralel bağlı röleler ve kapasitörler, kapasite dizisini oluşturmaktadır. Rölelerin kontrolü kapasite dizisi algoritması aracılığıyla sağlanmaktadır. Alıcı-verici bobinlerin endüktansları ve karşılıklı endüktans, fonksiyon blokları kullanılarak tasarlanan değişken endüktörler tarafından temsil edilmektedir. Alıcı devre kapasitesi ve yük direnci sistem çıkışına eklenmiştir. Bobin endüktansları, karşılıklı endüktans ve kapasite dizisi değeri hazırlanan algoritma tarafından hesaplanmaktadır. Gerçekleştirilen modelin akış diyagramı Şekil 8’de sunulmuştur.



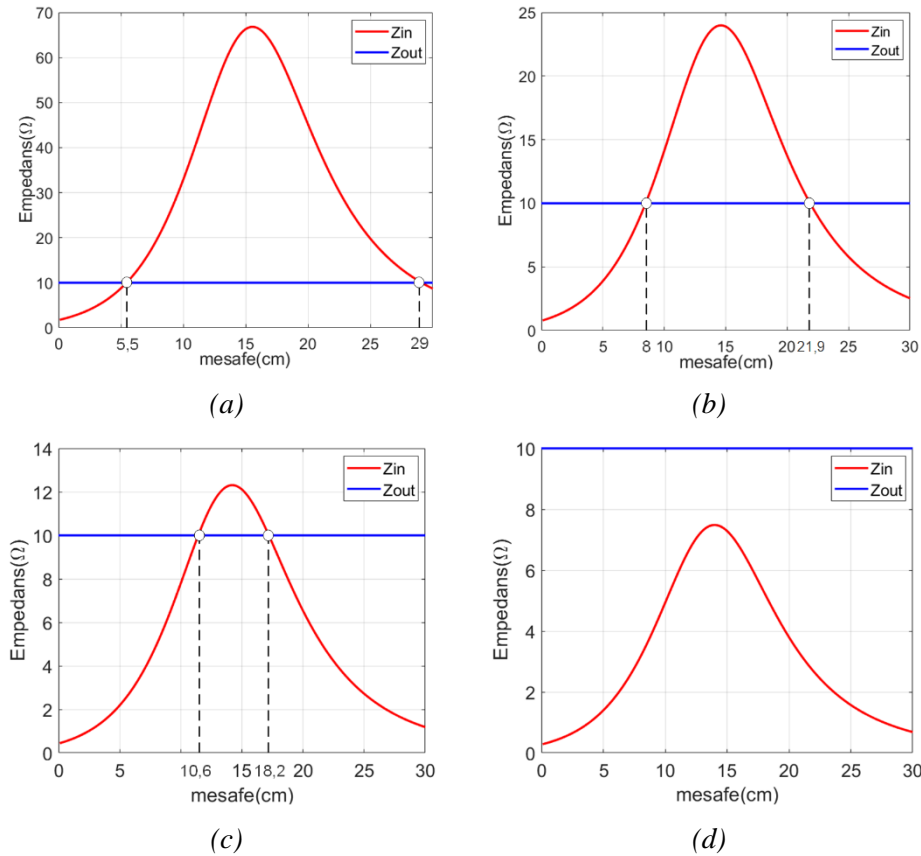
Şekil 8. Empedans ve karşılıklı endüktans analiz modeli akış diyagramı

Modelde ilk olarak, bobinlere ait tur sayıları, iç çap ve dış çap değerleri kullanılarak bobin endüktansları Eşitlik 10'da verilen Wheeler metoduyla hesaplanmaktadır. Eşitlikte her bir bobine ait tur sayısı  $N$ , dairesel alanın merkez noktası ile bobinin ortalama genişliği arası mesafe  $r$ , ve bobinin ortalama genişliği  $w$  ile temsil edilmektedir.

$$L = \frac{r^2 N^2}{(8r+11w)} \quad (10)$$

Sistemin eşdeğer empedansı ve karşılıklı endüktansı için başlangıç değerleri  $C_1=10nF$ ,  $d=0cm$  ve  $M=0\mu H$  olarak tanımlanmıştır. Model, ilk kapasite değeri için karşılıklı endüktans değerini hesaplamaktadır. Hesaplama Eşitlik 2.8 kullanılarak her bir hücre için toplamsal olarak yapılmaktadır. Karşılıklı endüktansın değeri, Eşitlik 2.9'da yerine konularak sistemin giriş empedansı  $Z_{in}$  hesaplanmaktadır. Elde edilen giriş empedansı, karşılıklı endüktans, kullanılan kapasite değeri ve bobinler arasındaki mesafe kaydedilerek kapasite değeri  $0,1nF$  adımlar ile artırılmakta ve  $d=0-30cm$  mesafe aralığı için  $0,1cm$  hassasiyetle hesaplanmalar yapılmaktadır. Hesaplama sonucunda giriş empedansı ve yük empedansının eşit olduğu kapasite değeri ve aktarım mesafesi belirlenebilmektedir.

Model örnek senaryolar için çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Tüm senaryolarda bobin parametreleri eşit, çıkış yükü  $R_L=10\Omega$  olarak kabul edilmiştir.  $C_2$  kapasitörü sadece alıcı bobinin rezonans frekansına etki etmesi nedeni ile sabit tutulmuştur. Mesafe  $d=0-30cm$  aralığında,  $C_1=10nF-25nF$  aralığında artırılmıştır. Her bir çözüm için kapasite artış adımı  $0,1nF$  olarak belirlenmiş ve bu sayede hassasiyet artırılmıştır. Örnek senaryolar için elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir.



**Şekil 9.** Farklı kapasite değerlerinde giriş empedansı değişimi,  
a)  $C_1=10nF$ , b)  $C_1=15nF$ , c)  $C_1=20nF$ , d)  $C_1=25nF$

Grafiklerde görüldüğü üzere  $C_1$  kapasite değerine bağlı olarak giriş empedansı değişiklik göstermektedir. İlk senaryoda,  $d=5,5cm$  ve  $d=29cm$  mesafede giriş empedansı ve yük direncinin eşit olduğu görülmektedir. Aktarım mesafesi  $d=5,5cm$  için aktarımın gücü maksimum olmaktadır. Ancak  $d=29cm$  mesafede maksimum güç en yüksek mesafeye aktarılmaktadır. İkinci ve üçüncü senaryoda ise, kapasite değerinin artırılması ile aktarım gücünün daha yüksek olacağı mesafe değerlerinin yaklaşık olarak  $d=8cm$  ve

$d=21,9cm$ ,  $d=10,6cm$  ve  $d=18,2cm$  olduğu görülmektedir. Yine bu senaryolar için de en yüksek aktarım mesafesinin  $d=21,9cm$  ve  $d=18,2cm$  'de olduğu, aktarılan gücün maksimum olacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Dördüncü senaryoda  $C_1=25 nF$  seçilmesi durumunda giriş ve çıkış empedansının hiç eşleşmediği, aktarılan güç miktarının diğer senaryolardan daha düşük olacağı gözlemlenmektedir. Bu durumlar değerlendirildiğinde, modellemesi yapılan bu sistemin belirli bir mesafe aralığı için ihtiyaç duyulabilecek kapasite değerleri belirlenebilmektedir. Belirlenen kapasite değerleri için topoloji değişikliği yapılabilen bir sistem kurulması halinde, mesafe değişiminde aktarılan gücün yüksek tutulabilmesi sağlanabilmektedir.

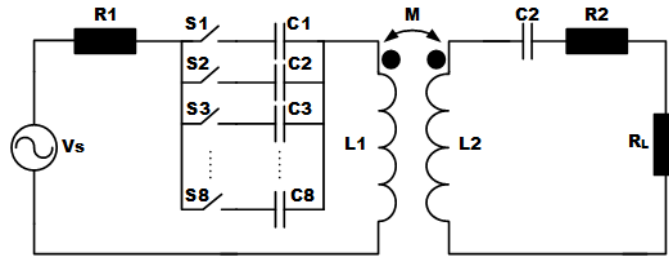
#### 4. TASARIM VE UYGULAMA (DESIGN AND APPLICATION)

Giriş empedansını farklı mesafeler için ayarlayabilmek amacıyla denetleyici, röle sistemi ve farklı kombinasyonlarda kurulan 8 kapasite hattından meydana gelen bir seri kapasitör devresi tasarlanmıştır. Kapasite hattı sayısı artırılarak daha hassas kapasite ayarlaması da yapılabilmektedir. Oluşturulan kapasite sisteminde Tablo 1'de verilen kapasitörler yer almaktadır.

**Tablo 1.** Kapasitörlerin etiket ve ölçülen gerçek değerleri

Hat No	Kapasite	
	Etiket Değeri	Ölçülen Değer
1	502 nF	464 nF
2	253 nF	245 nF
3	122 nF	120 nF
4	66 nF	64,7 nF
5	33 nF	32,7 nF
6	15 nF	14,13 nF
7	8,25 nF	7,21 nF
8	5 nF	4,71 nF

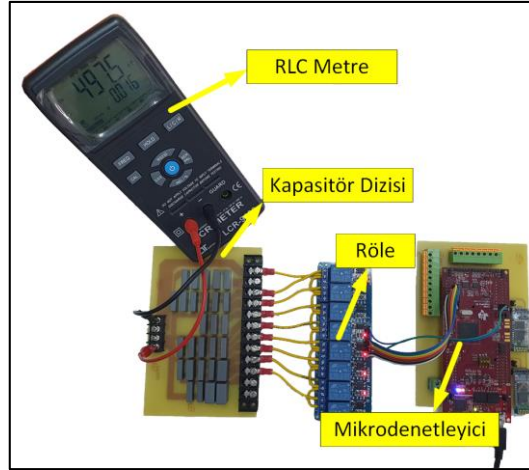
Tabloda verilen kapasite değerleri çeşitli kapasitörlerin seri ve paralel bağlanması ile elde edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kapasite hatları eklenen devre topolojisi Şekil 10' verilmiştir.



**Şekil 10.** Seri kapasite hatları eklenmiş devre topolojisi

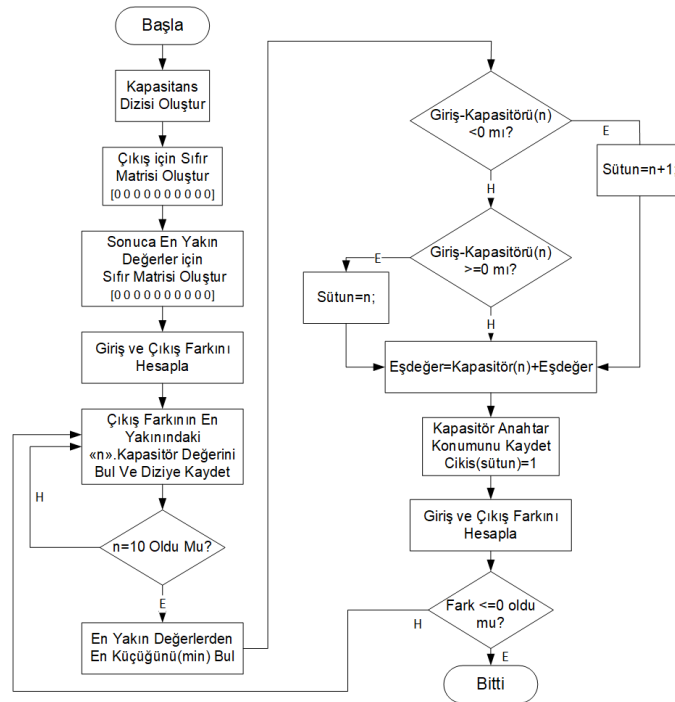
Tabloda verilen kapasite değerleri etiket değerleri olup, gerçek değerleri RLC metre kullanılarak ölçülmüştür. Kapasitelere ait tolerans değerleri bu sayede değerlendirilmiş ve en doğru sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca farklı frekanslarda kapasite değerlerinin değişkenlik göstermesi nedeni ile ölçüm, sistem çalıştırma frekansı olan 85kHz'e yakın olan 100kHz frekansta gerçekleştirilmiştir. Böylelikle frekansın tolerans üzerindeki etkisi en aza indirilmiştir. Ölçülen bu kapasiteler kullanılarak bir kapasite kontrol devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan kapasite kontrol devresi Şekil 11'de sunulmuştur.





Şekil 11. Tasarlanan kapasite kontrol devresi

Oluşturulan kapasite hatları birbirlerine paralel olarak bağlanabilen kombinasyonlar şekilde kullanılmaktadır. Kapasite kontrolü, DSP aracılığıyla Simulink modeliyle gerçek zamanlı olarak çalışabilmektedir. Mesafenin anlık değerine göre önceden belirlenen kapasite kombinasyonu devreye alınmaktadır. Kapasite kontrol devresinin kontrolü için tasarlanan Simulink modeli, gerekli kapasite değerine en yakın diziyi hesaplamaktadır. Hesaplama için kullanılan 8 elemanlı kapasite dizisi, çıkış dizisi ve en yakın kombinasyonun kaydedildiği bir dizi modelde tanımlanmaktadır. İstenilen kapasite değeri ile tanımlanan kapasite dizisindeki her bir kapasite değeri arasındaki fark alınarak, istenilen değere en yakın dizi elemanı bulunmaktadır. Bulunan bu dizi elemanına, bir sonraki dizi elemanı eklenerek aradaki fark tekrar hesaplanmaktadır. Farkın sıfırdan büyük olduğu tüm durumlarda tekrar hesaplama yapılmaktadır. Bu hesaplamalar yapılır iken kullanılan her kapasite değeri için "1" bilgisi, kullanılmayan kapasite değerleri için "0" bilgisi çıkış dizine kaydedilmektedir. Farkın sıfır veya daha düşük olduğu durumda ise istenilen kapasite değerine en yakın kombinasyon oluşturulmaktadır. Elde edilen çıkış dizisi, Simulink modeli tarafından DSP'ye dijital çıkış olarak aktarılmaktadır. Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 12'de sunulmuştur.



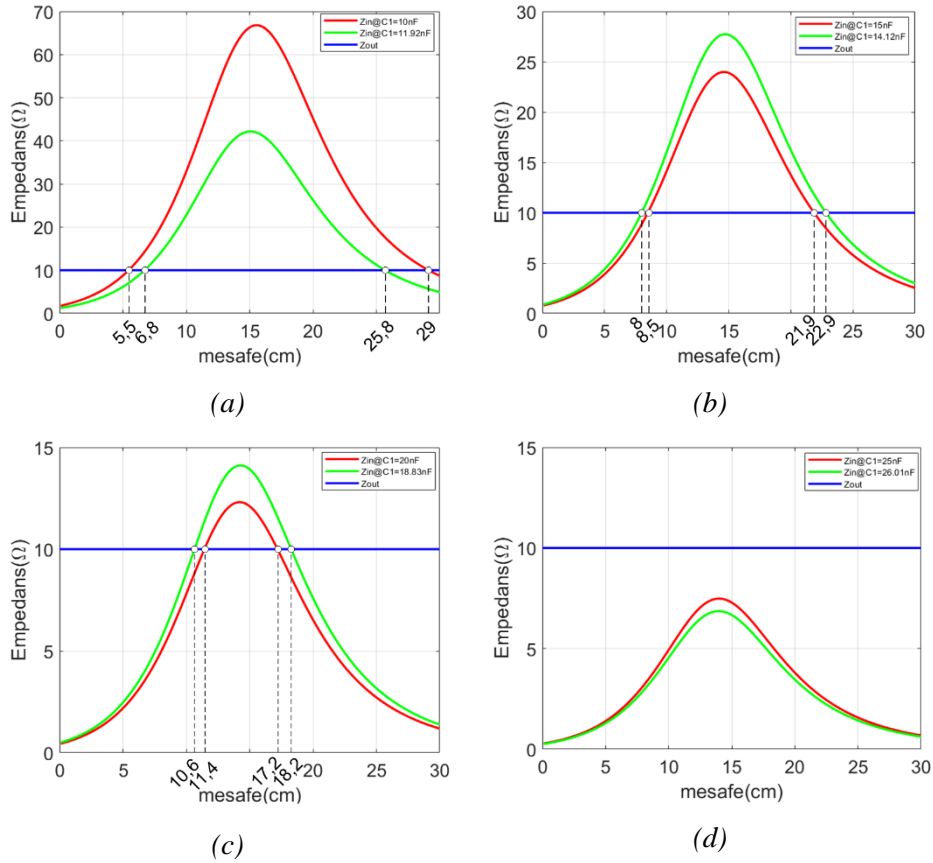
Şekil 12. Hesaplama ve çıkış kontrol algoritması akış diyagramı

Kontrol sistemi, tüm olasılıkları hesaplamakta, istenilen değere en yakın kapasite kombinasyonunu sağlayacak şekilde röleleri devreye almaktadır. Her bir röle hattının bağlı olduğu kapasite, paralel olarak eşdeğer kapasite devresine bağlanmaktadır. Elde edilen kapasite eşdeğeri, enerji aktarım sistemine seri olarak bağlanmaktadır. Seri olarak oluşturulan kapasite dizisi, 100 farklı olasılık ile test edilerek Tablo 2’de sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Kapasite olasılıkları deney sonuçları

İstenen (nF)	Ölçülen (nF)	İstenen (nF)	Ölçülen (nF)	İstenen (nF)	Ölçülen (nF)	İstenen (nF)	Ölçülen (nF)
5	4,74	130	128,35	255	254,40	380	381,10
10	11,92	135	135,41	260	259,20	385	386,00
15	14,12	140	140,13	265	266,50	390	388,60
20	18,83	145	147,45	270	268,80	395	395,80
25	26,01	150	152,07	275	273,50	400	400,70
30	32,74	155	154,49	280	280,80	405	403,20
35	32,74	160	161,75	285	288,10	410	408,00
40	39,97	165	166,52	290	292,90	415	415,40
45	44,69	170	168,73	295	295,30	420	420,40
50	51,60	175	176,09	300	300,40	425	423,10
55	54,11	180	180,77	305	307,40	430	430,30
60	58,82	185	187,61	310	310,00	435	434,80
65	65,12	190	192,33	315	314,90	440	442,40
70	69,80	195	194,97	320	322,00	445	442,40
75	77,02	200	201,90	325	326,80	450	450,30
80	79,29	205	206,70	330	329,40	455	455,10
85	86,56	210	209,30	335	334,20	460	462,50
90	91,26	215	214,00	340	341,20	465	465,10
95	98,14	220	221,20	345	343,90	470	470,10
100	102,83	225	225,90	350	348,70	475	477,20
105	105,40	230	228,50	355	356,20	480	477,20
110	110,03	235	235,60	360	361,00	485	485,30
115	117,08	240	240,40	365	363,20	490	485,30
120	121,14	245	247,60	370	368,30	495	497,50
125	125,90	250	254,40	375	375,50	500	501,10

Kapasite dizisinin değer aralığı farklı bobin yapıları için esneklik oluşturması amacı ile çok sayıda olasılığa göre tasarlanmıştır. Böylelikle, sistemin giriş empedans aralığının rezonans frekansına ulaşabilirliği artırılmıştır. Benzetim çalışmasında vurgulanan dört farklı senaryo, gerçek kapasite değerlerine göre tekrarlanmıştır. Senaryolarda yer alan kapasite değerlerine en yakın kapasiteler sistem tarafından belirlenmiştir. Bu sayede kapasite toleransının etkisinin dâhil edildiği değişken kapasitör tasarımı test edilmiştir. Yapılan bu deneylere ait grafikler Şekil 13’te sunulmuştur.



**Şekil 13.** Farklı kapasite değerlerinde giriş empedansı değişimi, a)  $C_1=10nF$  ve  $C_1^*=11,92nF$ , b)  $C_1=15nF$  ve  $C_1^*=14,12nF$ , c)  $C_1=20nF$  ve  $C_1^*=18,83nF$ , d)  $C_1=25nF$  ve  $C_1^*=26,01nF$

İlk grafik için  $C_1=10nF$  etiket değerine sahip bir kapasite için giriş empedansı grafiği yer almaktadır. Tablo 1'de verilen kapasite etiket değerlerine göre 10nF değerine en yakın 8,25nF kapasitesi ele alınması gerekirken, gerçek değerlere göre modelleme yapıldığında  $C_7$  ve  $C_8$  kapasitelerinin paralel olarak bağlanmasından elde edilecek olan  $C_1^*=11,92nF$  değeri en yakın değer olarak bulunmuştur. Bu kapasitenin giriş empedansına etkisi aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Sistemde kullanılan kapasitör değerlerinin hassasiyeti etkilediği ve etiket değeriyle gerçek kapasite değerleri arasındaki farkın sonuçları etkilediği açıkça gözlemlenmiştir. Etiket değerine göre sistemin giriş empedansı ve yük direnci 5,5cm mesafede eşit olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre 6,8cm'de eşit olmuştur. Bu durum, maksimum güç aktarım mesafesinin 1,3 cm daha ileriye kaymasına neden olmuştur. Empedans eşitliği ikinci kez etiket değerine göre  $d=29cm$ 'de olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre  $d=25,8cm$ 'de meydana gelmiştir. Gerçek kapasite değerine göre 3,2cm daha kısa mesafede empedans eşitliği oluşmuştur. Aynı şekilde ikinci grafikte,  $C_1=15nF$  teorik olarak hesaplanan değere en yakın kapasitenin gerçek değeri  $C_1^*=14,12nF$  olarak elde edilmiştir. Bu durumun aktarım mesafesini olumlu yönde etkilediği açıkça görülmektedir. Etiket değerine göre  $d=8,5cm$  mesafede empedans eşitliği sağlanması gerekirken,  $d=8cm$  mesafede eşitlik gerçekleşmiştir. 0,5cm daha kısa mesafede empedans eşitliği sağlanmıştır. Aynı değer için ikinci kez empedans eşitliği ise etiket değerine göre  $d=21,9cm$  mesafede, gerçek kapasite değerine göre  $d=22,9cm$ 'de gerçekleşmiştir. Gerçek kapasite değerinde aktarım mesafesinin 1cm daha yüksek olduğu görülmüştür. Üçüncü grafikte de önceki grafikte olduğu gibi aktarım mesafesi, ilk empedans eşleşmesi için  $d=11,4cm$  yerine  $d=10,6cm$  olmuş, ikinci empedans eşleşmesi için  $d=17,2cm$  olması gerekirken  $d=18,2cm$ 'ye ulaşmıştır. Yüksek güç aktarımı için ilk empedans eşitliğinin aktarım mesafesini olumsuz, ikinci empedans eşitliğinin olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Son grafikte ise empedans eşitliğinin,  $C_1=25nF$  kapasite kullanıldığı durumda hiçbir mesafede eşleşme olmadığı görülmektedir. Bu kapasiteye en yakın olarak elde edilebilen  $C_1^*=26,01nF$  kapasite değerinin de bu duruma çok yakın bir sonuç verdiği, aktarım gücünün hiçbir zaman maksimum olamayacağı açıkça görülmüştür. Bu sonuçlar kullanılan kapasite değerlerinin gerçek değerlerine göre tanımlanmasının, sistemin güç aktarım kapasitesinin yüksek tutulabilmesi için gerekli olduğunu göstermektedir. Topolojide kullanılacak olan kapasite değerleri

belirlenirken, gerçekte elde edilmesi gereken kapasite değerini oluşturacak büyüklükte kapasitelerden oluşturulmasının en yakın sonuçların elde edilmesine yardımcı olacağı ortaya konulmaktadır.

## 5. SONUÇ(CONCLUSION)

Seri-Seri manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemlerinde alıcı – verici bobinler arası mesafenin değişmesi güç aktarımını olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada bobinler arası aktarım gücünün yüksek tutulabilmesi amacıyla kullanılan seri kapasite değerinin sistem giriş empedansına etkisi gerçekleştirilen model üzerinde incelenmiştir. Modellemede ilk olarak mesafe değişiminin giriş empedansı üzerindeki etkisi kapasitörlerin etiket değerleri kullanılarak analiz edilmiştir. Daha sonra 8 adet kapasitörden oluşturulan esnek değişken kapasite matrisi oluşturulmuş, bu dizide kapasitörlerin seri/paralel bağlantısıyla meydana getirilebilecek tüm değerler ölçülmüştür. Bu sayede elde edilen gerçek kapasite değerleri geliştirilen modelde daha önce etiket değerleri kullanılan kapasite değerleri yerine kullanılmış ve giriş empedansının mesafeye bağlı değerleri hesaplanmıştır. Buna ilaveten gerçekleştirilen kapasite dizisinde bulunan eleman değerleri kullanılarak bobinler arası mesafenin değişimine göre empedans eşleştirmesinin yapılabileceği en yakın eşdeğer kapasitenin ayarlanabildiği bir algoritma geliştirilmiştir. Örnek senaryolar sunularak, kapasitelerin etiket değerleriyle gerçek değerleri kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda, ilk senaryo için empedans eşitliğinin  $d=5,5cm$  ve  $d=29cm$  mesafede eşit olması gerekirken,  $d=6,8cm$  ve  $d=25,8cm$ 'de eşit olduğu görülmüştür. İkinci senaryoda, empedans eşitliği kapasitenin etiket değerine göre  $d=8,5cm$  ve  $d=21,9cm$  eşit olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre  $d=8cm$  ve  $d=22,9cm$  mesafede eşit olmuştur. Üçüncü senaryoda ise kapasitenin etiket değerine göre empedans eşitliği  $d=11,4cm$  ve  $d=17,2cm$  mesafede olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre  $d=10,6cm$  ve  $d=18,2cm$  mesafede eşit olmuştur. Son senaryoda ise uygulanan kapasite değerinde empedans eşitliğinin hiçbir zaman olmayacağı görülmüştür. Sonuç olarak kablosuz enerji transferi için tasarlanacak böyle bir sistemde kapasitelerin gerçek değerlerine göre tanımlanmasının gerekliliği ispatlanmıştır. Modellemede bobinler arası mesafe değişimine karşılık elde edilen sonuçlara göre kapasite topolojisinin oluşturulmasıyla, istenilen değere en yakın sonuçlara ulaşılabildiği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR(ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi tarafından 07/2018-10 kodu ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N, Tesla, "The Transmission of Electrical Energy Without Wires", Electrical World and Engineer, March 5, 1904.
- [2] X, Liu, L, Clare, X, Yuan, C, Wang, and J, Liu, "A Design Method for Making an LCC Compensation Two-Coil Wireless Power Transfer System More Energy Efficient Than an SS Counterpart," Energies, vol, 10, no, 9, p, 1346, 2017.
- [3] X, Liu, T, Wang, X, Yang, N, Jin, and H, Tang, "Analysis and Design of a Wireless Power Transfer System with Dual Active Bridges," Energies, vol, 10, no, 10, p, 1588, 2017.
- [4] Z, Zhang, K, T, Chau, C, Liu, F, Li, and T, W, Ching, "Quantitative Analysis of Mutual Inductance for Optimal Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling," IEEE Transactions on Magnetics, vol, 50, no, 11, pp, 1-4, 2014, doi: 10,1109/TMAG,2014,2329298.
- [5] G, Tortora, F, Mulana, G, Ciuti, P, Dario, and A, Menciassi, "Inductive-Based Wireless Power Recharging System for an Innovative Endoscopic Capsule," Energies, vol, 8, no, 9, pp, 10315-10334, 2015.
- [6] R, Xue, K, Cheng, and M, Je, "High-Efficiency Wireless Power Transfer for Biomedical Implants by Optimal Resonant Load Transformation," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol, 60, no, 4, pp, 867-874, 2013, doi: 10,1109/TCSI,2012,2209297.

- [7] A, Shekhar, V, Prasanth, P, Bauer, and M, Bolech, "Economic Viability Study of an On-Road Wireless Charging System with a Generic Driving Range Estimation Method," *Energies*, vol, 9, no, 2, p, 76, 2016.
- [8] Y, Gao, K, B, Farley, and Z, T, H, Tse, "A Uniform Voltage Gain Control for Alignment Robustness in Wireless EV Charging," *Energies*, vol, 8, no, 8, pp, 8355-8370, 2015.
- [9] U, K, Madawala and D, J, Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 58, no, 10, pp, 4789-4796, 2011, doi: 10.1109/TIE,2011,2114312.
- [10] J, Shin et al., "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 61, no, 3, pp, 1179-1192, 2014, doi: 10.1109/TIE,2013,2258294.
- [11] H, Huy, L, Seunggyu, K, Youngsu, C, Yunho, and F, Bien, "An adaptive technique to improve wireless power transfer for consumer electronics," in 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 13-16 Jan, 2012, pp, 359-360, doi: 10.1109/ICCE,2012,6161901.
- [12] J, C, Lin, "Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects [Telecommunications Health and Safety]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol, 55, no, 2, pp, 250-253, 2013, doi: 10.1109/MAP,2013,6529362.
- [13] Y, Lu and D, B, Ma, "Wireless Power Transfer System Architectures for PorTablo or ImplanTablo Applications," *Energies*, vol, 9, no, 12, p, 1087, 2016.
- [14] R, Bashirullah, "Wireless Implants," *IEEE Microwave Magazine*, vol, 11, no, 7, pp, S14-S23, 2010, doi: 10.1109/MMM,2010,938579.
- [15] A, P, Sample, D, A, Meyer, and J, R, Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 58, no, 2, pp, 544-554, 2011, doi: 10.1109/tie,2010,2046002.
- [16] A, Kurs, A, Karalis, R, Moffatt, J, D, Joannopoulos, P, Fisher, and M, Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol, 317, no, 5834, pp, 83-86, 2007, doi: 10.1126/science,1143254.
- [17] B, H, Waters, A, P, Sample, P, Bonde, and J, R, Smith, "Powering a Ventricular Assist Device (VAD) With the Free-Range Resonant Electrical Energy Delivery (FREE-D) System," *Proceedings of the IEEE*, vol, 100, no, 1, pp, 138-149, 2012, doi: 10.1109/JPROC,2011,2165309.
- [18] Z, N, Low, R, A, Chinga, R, Tseng, and J, Lin, "Design and Test of a High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 56, no, 5, pp, 1801-1812, 2009, doi: 10.1109/TIE,2008,2010110.
- [19] J, Park, B, Park, J, Lee, Y, Ryu, E, Park, and S, Kwon, "Optimum frequency of high Q-factor resonator for magnetic resonance coupling," in 2011 41st European Microwave Conference, 10-13 Oct, 2011, pp, 61-63, doi: 10.23919/EuMC,2011,6101706.
- [20] T, Beh, M, Kato, T, Imura, and Y, Hori, "Wireless power transfer system via magnetic resonant coupling at fixed resonance frequency -power transfer system based on impedance matching-," *World Electric Vehicle Journal*, vol, 4, pp, 744-753, 2011.
- [21] P, Raval, D, Kacprzak, and A, P, Hu, "A wireless power transfer system for low power electronics charging applications," in 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 21-23 June 2011, pp, 520-525, doi: 10.1109/ICIEA,2011,5975641.

- [22] C, Li, H, Zhang, and X, Jiang, "Parameters optimization for magnetic resonance coupling wireless power transmission," *ScientificWorldJournal*, vol, 2014, p, 321203, 2014, doi: 10.1155/2014/321203.
- [23] N, Y, Kim et al., "Automated adaptive frequency tracking system for efficient mid-range wireless power transfer via magnetic resonance coupling," in *Microwave Conference (EuMC), 2012 42nd European*, Oct, 29 2012-Nov, 1 2012, pp, 221-224.
- [24] O, Jonah, S, V, Georgakopoulos, and M, M, Tentzeris, "Optimal Design Parameters for Wireless Power Transfer by Resonance Magnetic," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol, 11, pp, 1390-1393, 2012, doi: 10.1109/LAWP,2012,2228459.
- [25] S, Y, R, Hui, W, Zhong, and C, K, Lee, "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol, 29, no, 9, pp, 4500-4511, 2014, doi: 10.1109/TPEL,2013,2249670.
- [26] B, Waters, A, Sample, and J, Smith, "Adaptive impedance matching for magnetically coupled resonators," *PIERS Proceedings*, pp, 694-701, 2012.
- [27] G, Buja, M, Bertoluzzo, and K, N, Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 62, no, 12, pp, 7436-7447, 2015, doi: 10.1109/tie.2015.2455524.
- [28] Y, Lim, H, Tang, S, Lim, and J, Park, "An Adaptive Impedance-Matching Network Based on a Novel Capacitor Matrix for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol, 29, no, 8, pp, 4403-4413, 2014, doi: 10.1109/tpel,2013,2292596.
- [29] A, Karalis, J, D, Joannopoulos, and M, Soljačić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol, 323, no, 1, pp, 34-48, 2008, doi: 10.1016/j.aop,2007,04,017.
- [30] B, L, Cannon, J, F, Hoburg, D, D, Stancil, and S, C, Goldstein, "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol, 24, no, 7, pp, 1819-1825, 2009, doi: 10.1109/TPEL,2009,2017195.
- [31] W,-S, L, H,-L, L, K,-S, O, J,-W, Yu,;, "Switchable Distance-Based Impedance Matching Networks for a Tunable HF System," *Progress In Electromagnetics Research*, vol, 128, pp, 19-34, 2012.
- [32] K, Aditya, M, Youssef, and S, S, Williamson, "Design considerations to obtain a high figure of merit in circular archimedean spiral coils for EV battery charging applications," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, 9-12 Nov, 2015, pp, 005396-005401, doi: 10.1109/IECON,2015,7392949.
- [33] S, Chopra and P, Bauer, "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 9-13 Oct, 2011, pp, 1-6, doi: 10.1109/INTLEC,2011,6099774.
- [34] S, Babic, S, Salon, and C, Akyel, "The mutual inductance of two thin coaxial disk coils in air," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol, 40, no, 2, pp, 822-825, 2004, doi: 10.1109/TMAG,2004,824810.
- [35] Wang, J, Leach, M, Lim, EG, Wang, Z, Huang, Y, Investigation of magnetic resonance coupling circuit topologies for wireless power transmission, *Microw Opt Technol Lett*, 2019; 61: 1755– 1763, <https://doi.org/10.1002/mop,31803>.
- [36] J, Sallan, J, L, Villa, A, Llombart and J, F, Sanz, "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 56, no, 6, pp, 2140-2149, June 2009, doi: 10.1109/TIE,2009,2015359.
- [37] J, C, Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford Universtiy Press, 1881.

- [38] S, D, Barman, A, W, Reza, N, Kumar, M, E, Karim, and A, B, Munir, "Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol, 51, pp, 1525-1552, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.031.
- [39] B, K, Kushwaha, G, Rituraj, and P, Kumar, "Mathematical model of series-series compensation for contactless power transfer system," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, 9-12 Nov, 2015, pp, 001321-001326, doi: 10.1109/IECON.2015.7392283.

## Production and Characterization of PbS Quantum Dot Thin Films

İdris CANDAN<sup>1,\*</sup> <sup>1</sup>Kocaeli University, Faculty of Arts and Science, Department of Physics, 41001, İzmit/KOCAELİ

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 13/11/2019

Revision: 13/12/2019

Accepted: 13/12/2019

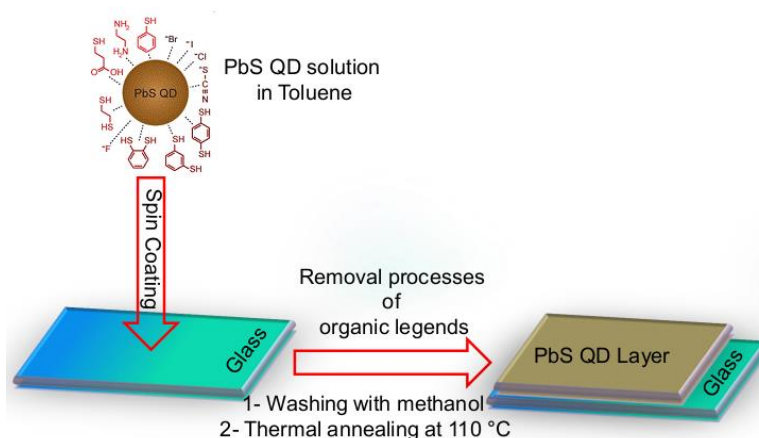
#### Highlights

- PbS Quantum dot layer was successfully deposited by spin coating method.
- The fabricated QD thin film was optically active in the near-infrared (near-IR) region as expected.
- The organic legends and pin holes were removed from the structure by washing with methanol and annealing under low pressure.

#### Keywords

Lead sulfide quantum dots (PbS QDs)  
Thin films  
Photoluminescence spectroscopy (PL)  
Raman spectroscopy

In this study, lead sulfide quantum dot (PbS QD) thin films have been produced onto soda lime silicate glass substrates by spin coating method. Absorption spectroscopy and photoluminescence (PL) emission spectroscopy methods were used to investigate the optical properties of quantum dot thin film samples. Spectroscopic methods indicated that the fabricated thin films were optically active in the near-infrared (near-IR) region as expected. The structural properties of quantum dot thin films were carried out by using confocal Raman spectroscopy, atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) measurements. The AFM analysis of the produced thin films indicated that the particle size on the surface varied in between 0.5 nm and 1.0 nm. The SEM micro images of samples also shown that the organic layer was removed from the film surface by washing with methanol and pinholes was disappeared in the film structure after annealing process under the low pressure.



**Figure A.** Schematic representation of PbS quantum dot thin film layer production.

**Purpose:** In this study, PbS QD thin film was produced and characterized by using several characterization methods to use in the solar cell as an active layer.

**Theory and Methods:** PbS quantum dot thin film layer was successfully deposited by spin coating method as illustrated in **Figure A**. To solve the organic legends in the PbS QD thin film structure, two step processes were employed to thin film samples. In the first step, the samples were washed with pure methanol. In the second step, the samples were subjected to thermal annealing process at 110 °C under the low pressure.

**Results:** The absorption spectrum showed that is the highest peak value of absorption for thin film was at 730 nm, which was in the near-infrared (near-IR) region and the absorption coefficient was around  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ . PbS quantum thin film gave only one PL emission peak at 1.35 eV which corresponded to wavelength value of 915 nm in the near infrared region. The root mean square (RMS) roughness value of the PbS QD thin film was computed as 2.11 nm from AFM measurement. The SEM images exhibited that oleic acid in the PbS QD solution prevents the distribution of QDs on the surface, causing pinholes. It was observed that PbS QDs were homogeneously distributed to fill the gaps on the surface and the pinholes were closed by the heat treatment.

**Conclusion:** The washing and heat treatment processes after film coating are vital to remove organic wastes and to ensure homogeneous distribution of QD on the surface, respectively.





## PbS Kuantum Nokta İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu

İdris CANDAN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 41001, İzmit/KOCAELİ

### Öz

Bu çalışmada, kurşun sülfür kuantum nokta (PbS QD) ince filmler dönele kaplama yöntemi kullanılarak soda-kireç silikat cam alttaşlar üzerine üretildi. Kuantum nokta ince film numunelerinin optik özelliklerini araştırmak için soğurma spektroskopisi ve fotoluminesans (PL) emisyon spektroskopisi yöntemleri kullanıldı. Spektroskopik yöntem sonuçları, üretilen ince filmlerin beklenildiği gibi optik olarak yakın kızılötesi bölgesinde (near-IR) aktif olduğu gösterdi. Üretilen kuantum nokta ince filmlerin yapısal özelliklerinin tayini için eş odaklı Raman spektroskopisi, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri yapıldı. Raman spektroskopisi sonuçlarında, PbS yapısının enine optik modu (TO) ve boyuna optik modu (LO) gözlemlendi. Üretilen filmlerin AFM analizlerinden yüzey pürüzlülüğü 2.11 nm ve yüzeydeki partikül boyutlarının ortalama 0.5 nm ile 1.0 nm aralığında değiştiği hesaplandı. SEM görüntülerinden, üretim sonrasında metanol ile yıkama ve ısıtma işlemi yapılmamış numunelerin yüzeyinde organik bir katman ve yapıları içerisinde çok küçük deliklerin (*pinhole*) varlığı tespit edildi. Yıkama ve düşük basınç altında ısıtma işlemi yapılan numunelerin SEM görüntülerinde ise metanol yıkama ile organik tabakanın yapıdan uzaklaştığı ve düşük basınç altında ısıtma işlemi sonrasında çok küçük deliklerin kuantum noktalar tarafından kapatıldığı görüldü.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 13/11/2019  
Düzeltilme: 13/12/2019  
Kabul: 13/12/2019

### Anahtar Kelimeler

Kurşun sülfür kuantum noktalar (PbS QDs)  
İnce film  
Fotoluminesans  
spektroskopisi (PL)  
Raman spektroskopisi

### Keywords

Lead sulfide quantum dots (PbS QDs)  
Thin films  
Photoluminescence spectroscopy (PL)  
Raman spectroscopy

### Production and Characterization of PbS Quantum Dot Thin Films

#### Abstract

In this study, lead sulfide quantum dot (PbS QD) thin films have been produced onto soda lime silicate glass substrates by spin coating method. Absorption spectroscopy and photoluminescence (PL) emission spectroscopy methods were used to investigate the optical properties of quantum dot thin film samples. Spectroscopic methods indicated that the fabricated thin films were optically active in the near-infrared (near-IR) region as expected. The structural properties of quantum dot thin films were carried out by using confocal Raman spectroscopy, atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) measurements. The transverse optical mode (TO) and the longitudinal optical mode (LO) of the PbS structure were observed in the Raman spectroscopy results. The AFM analysis of the produced thin films indicated that the surface roughness of the film was 2.11 nm and the particle size on the surface varied in between 0.5 nm and 1.0 nm. In the SEM micro images, the presence of an organic layer and pinholes were detected on the surface and in the structure of samples before washing with methanol and annealing procedures, respectively. The SEM micro images of samples also shown that the organic layer was removed from the film surface by washing with methanol and pinholes was disappeared in the film structure after annealing process under the low pressure.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kuantum noktalar (*quantum dots (QDs)*) olarak adlandırılan yarıiletken nanokristaller (*NCs*), boyutları ortalama 2 nm ile 10 nm arasında değişen ve nokta benzeri ya da sıfır boyutlu (*zero dimensional '0D'*) olarak tanımlanan parçacıklardır [1,2]. Ortalama olarak 10 ile 50 arası atom içeren kuantum noktalar, yapay atomlar (*artificial atoms*) olarak da adlandırılırlar [3]. Kuantum noktalar 1980 yılında Ekimov ve

Onushchenko tarafından keşfedilmişlerdir [4]. İnorganik yarıiletken kuantum noktalar periyodik tablonun belirli gruplardaki elementlerden ya da belirli grupların eşleştirilmesi sonucunda elde edilirler. Bileşik haldeki kuantum noktalar genel olarak periyodik tablonun gruplarının II-VI, III-V veya IV-IV şeklinde eşleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Dolayısıyla, kuantum noktalar silikon (Si) veya germanyum (Ge) gibi tek elementli malzemelerden veya ZnSe, ZnS (II-VI grubu), CdSe, CdTe, PbSe, PbS (IV-VI grubu) ve InP, GaAs, InAs (III-V grubu) gibi bileşik yarıiletkenlerden üretilebilmektedirler [5,6]. Elde edilen bu yapılar, atomlar ve moleküllerde olduğu gibi yapı içerisinde bulunan yük taşıyıcılar yapay bir potansiyel tarafından kuşatılmış olup kesikli enerji seviyeleri oluşturmaktadır. Kuantum noktaların elektronik özellikleri kristalleşmenin boyutu ve şekli ile ilgilidir. Nanokristalin boyutu küçüldükçe, emisyon dalga boyunun azalacağı yerde etkin bant aralığını ( $E_g$ ) uyaran enerji miktarı artmaktadır. Yarıiletken kuantum noktaların en önemli avantajı olan  $E_g$  ve özgün opto-elektronik özelliklerinin partikül boyutunun kontrol edilmesi ile istenildiği gibi ayarlanabilmesi kuantum sınırlama etkisinden kaynaklanmaktadır [7,8]. Etkin bant aralığı yarıçap ile değişen küresel kuantum noktaların  $E_g$  değerlerinin teorik değişimi 1986 yılında Louis Brus tarafından hesaplanmıştır [9]. Brus denkleminde  $E_g$  değerlerinin teorik değişimi aşağıdaki denklemdeki gibidir.

$$E_g^{QD}(r) = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2r^2} \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{1.8e}{\epsilon r} \quad 1$$

Bu eşitlikte,  $r$  kuantum noktanın yarıçapı,  $\hbar$  Plank sabiti,  $m_e^*$  ve  $m_h^*$  elektronun ve boşluğun (*hole*) etkin kütlelerini,  $\epsilon$  kuantum nokta materyalinin dielektrik sabitini göstermektedir.

Bu özellikleri kullanılarak, kuantum noktalar partikül boyutuna bağlı olarak görünür (*visible*) bölgeden yakın kızılötesi (*near-IR*) bölgeye kadar düzenlenebilmesi ile hücrelerin spektral duyarlılığı ayarlanabilmektedir. Ayrıca, bu yapıların opto-elektrik özellikleri dışardan uygulanan elektrik ve manyetik alanlar, sıcaklık ve basınç gibi etkenler ile de istenilen şekilde ayarlanabilmektedir [10–12]. Elektronik ve optik özellikleri boyutlarına ve dış etkenlere bağlı olarak değiştirilebildiğinden yarıiletken kuantum noktalar, güneş hücreleri [13–15], lazerler [16,17], fotodedektörler [18,19], fototransistörler [20] ve ışık yayan diyotlar [21–23] gibi opto-elektronik cihazların yapımında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Ayrıca kuantum noktalar ince film olarak, organik ve inorganik temelli güneş hücrelerinde kullanılan yarıiletkenler ile beraber ince film olarak kaplanıp güneş radyasyonundan soğurma yapılan aralıklarının geliştirilmesi (*up conversion, down conversion*) veya katkılanarak soğurma yapan tabakaların duyarlılığın artırılması ile güneş hücrelerinin verimlilik değerlerinin iyileştirilmesi için de kullanılabilirler [24–27]. Bunlara ek olarak, biyoloji ve tıp alanlarındaki araştırmalarda farklı emisyon dalga boylarına sahip kuantum noktalar özellikle hastalıklı hücrelerin tayini ve teşhisi için floresan görüntüleme (*fluorescence imaging*) sistemlerinde biyo-işaretleyici (*biomarker*), ve biyosensör olarak sıkça kullanılmaktadır [28–31]. Kuantum noktaların bir diğer uygulama alanı ise su kaynaklarının, atmosferin ve yaşadığımız çevrenin evsel ve endüstriyel atıklardan kaynaklı kirlenmesini önlemek için fotokatalizör (*photocatalyst*) olarak da son yıllarda sıkça kullanılmaktadırlar [32,33].

Kuantum noktalar arasında kurşun sülfür kuantum noktalar (*lead sulfide (PbS) QDs*), boyutları kontrol edilerek ilk eksiton tepe noktasının soğurma dalga boyu kolayca yakın kızılötesine genişletilebilmelerinden dolayı bu yapılar geniş uygulama alanlarında yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. PbS kuantum noktaların  $E_g$  değerleri parçacık boyutları kontrollü olarak büyütülerek 0.7 eV ile 2.1 eV bant aralığında ayarlanabilmektedir [34]. PbS yarıiletkenlerin yığın (*bulk*) yapıları genellikle kızılötesi dedektörlerin yapımında kullanılmaktadır. Fakat, PbS yarıiletkenler kuantum nokta olarak üretildiklerinde fiziksel boyutları, Bohr eksiton yarıçapı (*Bohr exciton radius*) olarak tanımlanan elektron-boşluk (*elektron-hole*) çifti arasındaki mesafeden daha küçüktür. PbS yarıiletkenler için Bohr eksiton yarıçapı 20 nm civarında hesaplanmıştır [35]. Bohr eksiton yarıçapının büyüklüğü kuantumla sınırlı olan parçacık boyutlarının aralığını belirler. Fiziksel boyutları 10 nm'nin altından olan PbS kuantum noktalar güçlü kuantum sınırlamalar sergiler. Yığın malzemelerden kuantumla sınırlı yapılara yani kuantum noktalara geçiş ile beraber yarıiletkenlerden farklı olarak kuantum noktalar, bir foton ile birden fazla elektron-boşluk çiftinin oluşumu olarak tanımlanan çoklu eksiton üretimi (*multiple exciton generation (MEG)*)

özelliği kazanırlar [8,36]. Ayrıca, PbS yarıiletken kuantum noktalar  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  gibi yüksek soğurma katsayısına sahiptir ve bu değer bant aralığını değerinin üzerindedir [37]. Bu özelliklerinden dolayı PbS kuantum noktaların en önemli uygulaması 3. nesil güneş hücreleri (*3rd generation solar cells*) alanındaki uygulamalarıdır.

Bu araştırmada, güneş hücre uygulamaları için kullanılabilir kurşun sülfür (*PbS*) kuantum nokta ince filmler oda sıcaklığında dönel kaplama (*spin coating*) yöntemi kullanılarak üretildi. Üretilen ince filmlerin optik karakterizasyonu soğurma spektroskopisi (*absorption spectroscopy*) ve fotoluminesans spektroskopisi (*photoluminescence spectroscopy (PL)*) kullanılarak yapıldı. İnce filmlerin yapısal özellikleri için ise Raman spektroskopisi (*Raman spectroscopy*), atomik kuvvet mikroskobu (*atomic force microscopy (AFM)*) ve taramalı elektron mikroskobu (*scanning electron microscope (SEM)*) ölçümleri kullanılarak analiz edildi.

## 2. DENEYSEL METODLAR (EXPERIMENTAL METHODS)

Bu çalışmada kullanılan tüm PbS kuantum nokta ince filmler, iyi temizlenmiş soda-kireç silikat camlar (*soda lime silicate glass*) alttaşlar üzerine kaplandı. Kaplama aşamasına geçilmeden önce alttaşları kirlilikten arındırmak amacıyla temizleme işlemi gerçekleştirildi. Temizlik işleminde, öncelikle istenmeyen organik kirliliği gidermek için yüksek saflıkta deiyonize su (*DI-water*) ile hazırlanan seyreltik bir deterjan çözeltisi içerisinde  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ve ultrasonik banyoda 15 dakika tutulduktan sonra üzerindeki deterjan kalıntılarını gidermek için cam alttaşlar yüksek saflıktaki su ile durulandı. Temizliğin ikinci aşamasında, inorganik kirliliği gidermek için alttaşlar, yüksek saflıkta deiyonize su ile seyreltilmiş hidrojen peroksit (*hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)*) çözeltisi içerisinde konularak 15 dakika ultrasonik banyoda tutuldu ve ardından deiyonize su ile durulandı [38]. Kaplama aşamasından önce, soda-kireç silikat cam alttaşlar oda sıcaklığında yüksek saflıktaki azot ( $\text{N}_2$ ) gazı ile kurutulmuş kuantum nokta ince film kaplama işlemine geçildi.

İnce film kaplama işleminde kullanılan ve lot numarası (Lot# 700 nm– PbS 07007-E1) olan PbS kuantum noktalar, Evident Technologies'den satın alındı. Satın alınan PbS kuantum noktalara toluen çözücü ile 1:1 oranında dispersiyon işlemi yapılarak seyreltildi. Seyreltik kuantum noktalar, dönel kaplama (*spin coating*) yöntemi kullanılarak iyi temizlenmiş cam alttaşlar üzerine kaplandı. Kaplama işlemi esnasında,  $30 \text{ }\mu\text{L}$  seyreltilmiş PbS kuantum nokta miktarı ve  $2500 \text{ rpm}$  hızda 30 saniye döndürme parametreleri kullanıldı. Kaplama işlemi yapıldıktan sonra, organik kalıntıları çözerek yapıdan uzaklaştırmak ve yapıyı iyileştirmek için örnekler için iki farklı işlem uygulandı. Başlangıçta, kuantum nokta kaplı numuneler 5 dakika saf metanol içinde tutuldu. Daha sonra numuneler vakumlu fırın içerisinde yerleştirilerek  $1 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ 'dan daha düşük basınç değerinde  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 1 saat süre boyunca ısıl işlem (*annealing*) uygulandı [24,39].

Hazırlanan PbS kuantum nokta ince filmlerin optik karakterizasyonu için Ocean Optics, USB2000+UV-Vis UV-VIS sistemi kullanılarak soğurma spektroskopisi ve uyarıcı  $488 \text{ nm}$  dalga boyuna sahip bir argon iyon lazer (*Argon ion laser*) kullanılarak fotoluminesans (*PL*) emisyon spektrumu ölçümleri yapıldı. Yapısal özelliklerin tayini için oda sıcaklığında Jobin Yvon Horiba marka  $532 \text{ nm}$  dalga boyuna sahip Nd:YAG lazer uyarma kaynağı kullanılarak konfokal Raman (*confocal Raman*) ölçümleri yapıldı. Raman kaymalarını (*Raman shift*) belirlemek için çift monokromatör ve Peltier soğutmalı CCD dedektörü kullanıldı. Numunelerin yüzey analizleri için Multimode Veeco AFM microscope marka bir atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ince filmlerin yüzeyleri tarandı ve elde edilen veriler Nanoscope programı kullanılarak analiz edildi. Ayrıca, üretilen kuantum nokta ince filmlerin yüzey mikro görüntüleri JEOL JSM-6700F FE-SEM marka taramalı elektron mikroskobu (*SEM*) sistemi kullanılarak elde edildi.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

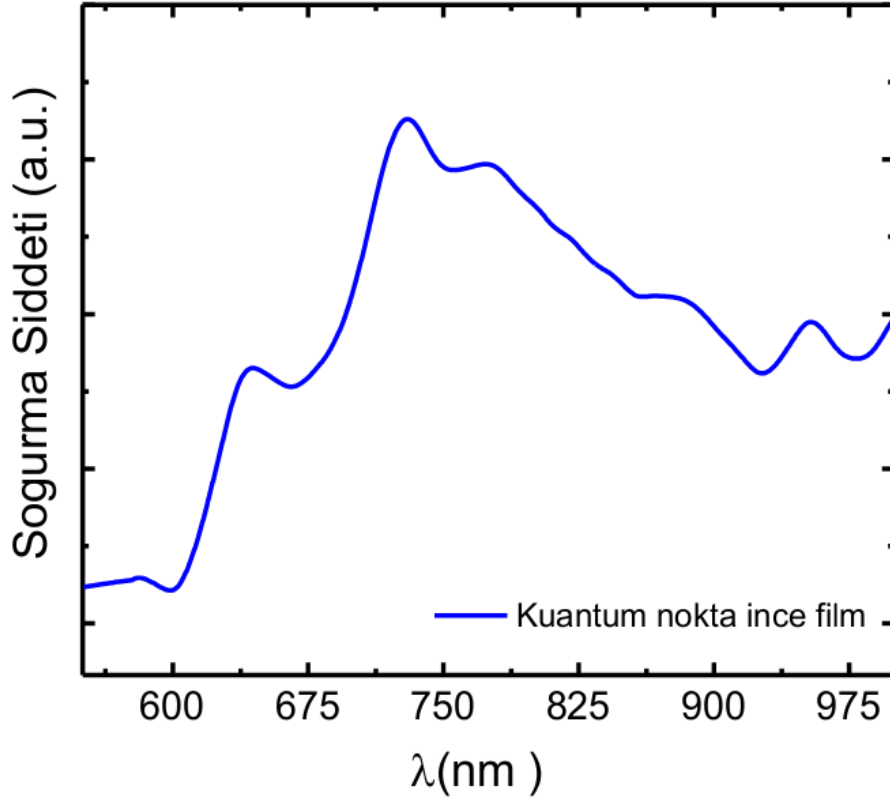
PbS kuantum nokta ince film numunelerinin optik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla soğurma (absorbsiyon) spektrumu ve fotoluminesans (PL) emisyon spektrumu ölçümleri gerçekleştirildi. PbS yığın (bulk) yarıiletkenler doğal olarak doğrudan bant geçişlerine sahiptir. Soğurma katsayısı ile optik etkin bant aralığını ( $E_g$ ) değeri arasındaki bağıntı Tauc eşitliği;

$$\alpha hv = (hv - E_g)^n \quad 2$$

ile verilmektedir [40]. Burada,  $\alpha$  soğurma katsayısı,  $h$  Planck sabiti,  $v$  frekans ( $hv$  foton enerjisi) ve  $n$  ise bant geçiş türüne bağlı olarak; doğrudan geçişli ( $n=1/2$ ), dolaylı geçişli ( $n=2$ ), yasaklı doğrudan geçişli ( $n=3/2$ ) ve yasaklı dolaylı geçişli ( $n=3$ ) değerlerini alabilmektedir.

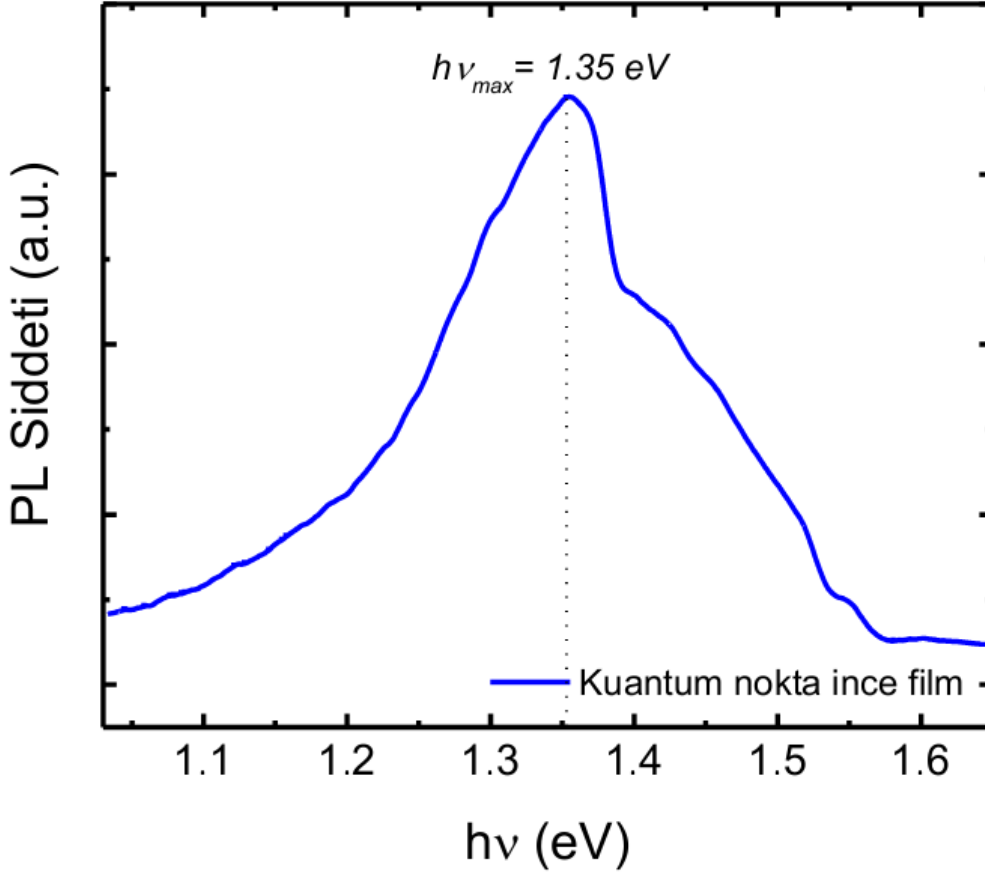
**Şekil 1**'de PbS kuantum nokta ince film örneğinin 550 nm ile 1000 nm aralığındaki dalga boyuna karşılık soğurma spektrumu verilmiştir. **Şekil 1**'den de görüldüğü gibi, 600 nm ile 1000 nm aralığındaki enerji değerlerine karşılık gelen fotonlar üretilen PbS kuantum nokta ince film katmanı ile etkileşmekte ve katman tarafından soğurulmaktadır. Bu etkileşim sonucunda örneğe gelen fotonlar ile örnek içerisinde diğer tarafa geçebilen fotonlar arasında soğurulmadan kaynaklanan enerji kaybı olmaktadır. Soğurma spektrumundan da görüldüğü gibi, soğurmanın en yüksek pik değeri olan 730 nm'de ince film için soğurma katsayısının (*absorption coefficient*)  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  civarında olduğu hesaplandı.

Bu çalışmada, üretilen PbS ince filmlerin 1.24 eV ile 2.06 eV aralığındaki yakın kızılötesi (*near-IR*) bölgesinde soğurma yaptığı ve maksimum soğurmanın olduğu 730 nm pikine karşılık gelen etkin bant aralığı değerinin 1.70 eV olduğu hesaplandı (**Şekil 1**). Bu sonuçlar yapıdaki kuantum noktaların çoğunlukla 730 nm dalga boyuna karşılık gelen 1.70 eV etkin bant aralığı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, etkin bant aralığının 1.24 eV ile 2.06 eV arasında değişen değerleri de alması, çalışmada kullanılan PbS kuantum noktaların tek bir boyuta sahip olmadığını ve yapı içerisinde boyutlarına bağlı olarak 1.24 eV ile 2.06 eV arasındaki değerlere karşılık gelen etkin bant aralığına sahip kuantum noktaların da olduğunu göstermektedir. PbS kuantum nokta ince filmler, yüksek soğurma katsayısına sahip olmaları ve etkin bant aralıklarının kızıl ötesi bölgesine karşılık gelmesinden dolayı güneş hücre yapısı içerisinde kullanılması ile güneşten gelen elektromanyetik radyasyonun kızıl ötesi bölgesindeki fotonları toplayabilen malzemelerdir. Bu özellikleri ile görünür bölgede şeffaf (*transparent*) güneş hücreleri ve/veya görünür bölgede soğurma yapan güneş hücrelerinin bant aralığını genişletecek şekilde entegre edilerek (*up conversion, down conversion*) daha yüksek verimlilik değerleri elde etmek için kullanılacak ideal malzemelerdir.



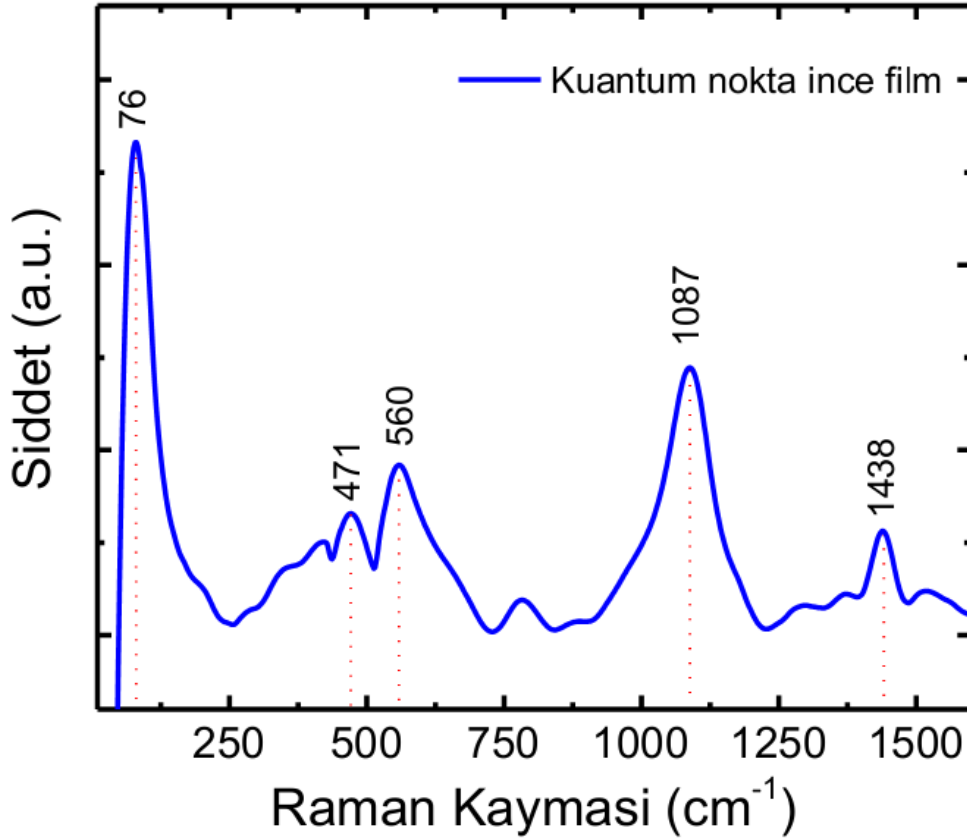
**Şekil 1:** Organik kalıntılardan arındırılmış PbS kuantum nokta ince filmin soğurma eğrisi.

Fotoluminesans spektroskopisi, malzemelerin opto-elektronik yapısını araştırmak için kullanılan ve araştırılan malzemeyi temas ile tahrip etmeyen bir yöntemdir. Üretilen PbS kuantum nokta ince filmlerin yapılarını fotoluminesans özelliklerini araştırmak için, 488 nm dalga boyuna sahip uyarıcı bir argon iyon lazer kaynağı kullanıldı. Üretilen kuantum nokta ince filmin fotonlar ile oda sıcaklığında uyarılması sonrasında yayınlanan ışınım bir dedektör ile takip edildi. Şekil 2’de üretilen PbS kuantum nokta ince filmlerden elde edilen foton enerjisine ( $h\nu$ ) karşılık PL şiddeti verilmiştir. PbS kuantum ince film için yakın kızılötesi bölge içerisinde 1.35 eV enerji değerinde bir tane PL emisyon piki gözlemlendi (Şekil 2). Yüzeyinde bulunan bağlar ve diğer kusurlar kuantum noktaların luminesan özelliklerini etkileyebilmektedir. Bununla beraber, alttaş olarak kullanılan camın bileşimi yüzeye kaplanan PbS kuantum noktaların büyümesini etkileyebilmektedir. Şekil 2’de verilen, 1.35 eV enerji değerindeki PL emisyon pikinin dalga boyu 915 nm civarında bir değere karşılık gelmektedir. Gözlenen bu PL piki literatürde PbS nanokristaller için rapor edilen piklerden biri olup, PbS kuantum noktaların 850 nm ile 950 nm aralığındaki cam ile ilişkili PL bantlarından biridir [41,42].



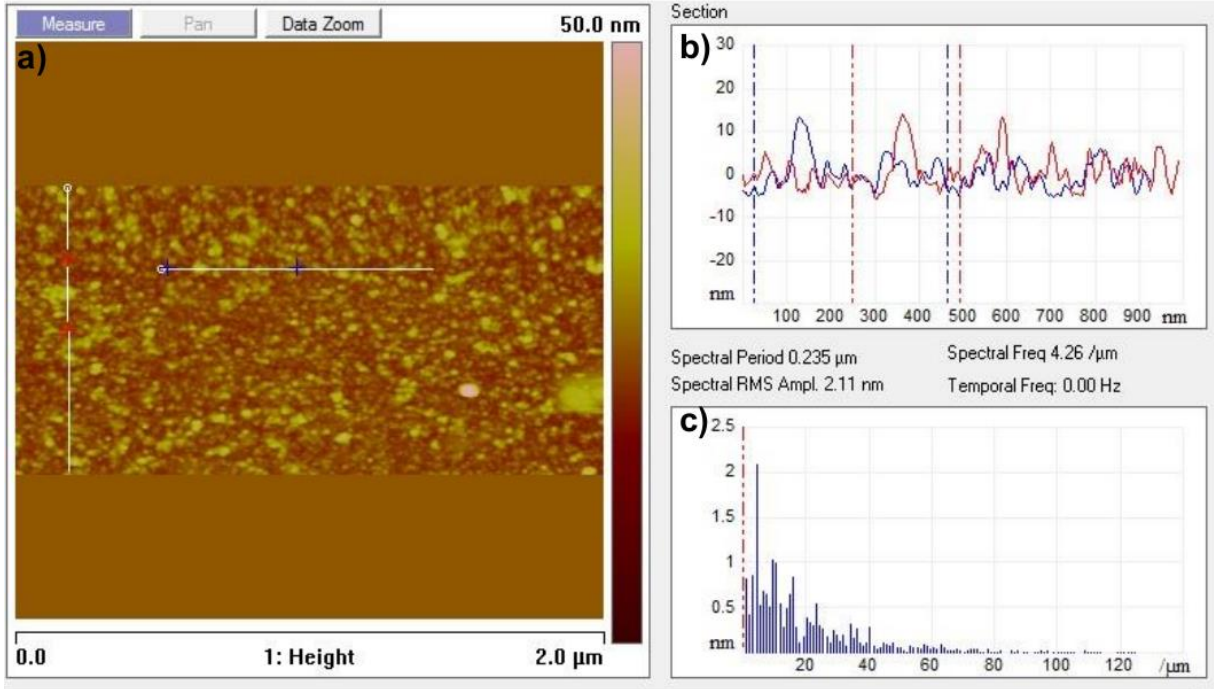
**Şekil 2:** Organik kalıntılardan arındırılmış PbS kuantum nokta ince filmin oda sıcaklığında ölçülen gelen foton enerjinine ( $h\nu$ ) karşılık fotoluminesans (PL) şiddeti.

PbS kuantum nokta ince filmin yapısal özellikleri hakkında bilgi almak için oda sıcaklığında eş odaklı Raman spektrum (*Confocal Raman spectrum*) ölçümü gerçekleştirildi. İnce film için elde edilen Raman spektrumu **Şekil 3**'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, üretilen PbS ince filmlerin Raman spektrumunda  $76$ ,  $471$ ,  $560$ ,  $1087$  ve  $1438$   $\text{cm}^{-1}$  konumlarında Raman pikleri gözlemlendi. Kurşun sülfür, IV-VI grubundaki kurşun kalkojenitlere (*lead chalcogenides*) ait olup yüz merkezli kübik (*face-centred cubic, FCC*) ve NaCl kristal yapısına sahiptir.  $Fm\bar{3}m$  ( $O_h^5$ ) uzay grubunda (*space group*) olan PbS'in kafes sabiti (*lattice constant*)  $a=5.93$  Å değerindedir [43]. En düşük eksiton durumundaki (*the lowest exciton state*) uyarda PbS'nin rezonant Raman saçılmasında, eksiton - fonon birleştirmesinden kaynaklanan TO, LO, 2LO ve yüzey modunda bir kaç mod Raman aktivitesi gösterir. Bu saçılmaların dalga boyları, kristal boyutuna ve yüzey pürüzlülüğüne kısmen bağlı olup yığın fononlardan farklıdır. Piklerin bağlı yoğunlukları ve temel ton yoğunlukları oranları büyük ölçüde uyarda kullanılan ışığın dalga boyu ile değişir [43].  $76$   $\text{cm}^{-1}$ 'deki pik PbS'in enine optik modu (*transverse optical (TO) mode*) ve  $471$   $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenen pik ise PbS'in boyuna optik modudur (*longitudinal optic (LO) mode*) [43]. Raman spektrumunda ortaya çıkan diğer pikler ise, yapının hava ortamında üretilmesinden kaynaklanan oksitlenme ve kusurlar sonucunda ortaya çıkan piklerdir.  $560$   $\text{cm}^{-1}$  piki PbO-PbSO<sub>4</sub> yapısının ve  $1087$   $\text{cm}^{-1}$  piki PbSO<sub>4</sub> yapısının ve  $1438$   $\text{cm}^{-1}$  piki ise SO<sub>2</sub> yapısının Raman pikleridir [44].



**Şekil 3:** Organik kalıntılardan arındırılmış PbS kuantum nokta ince film için oda sıcaklığında elde edilen Raman spektrumu.

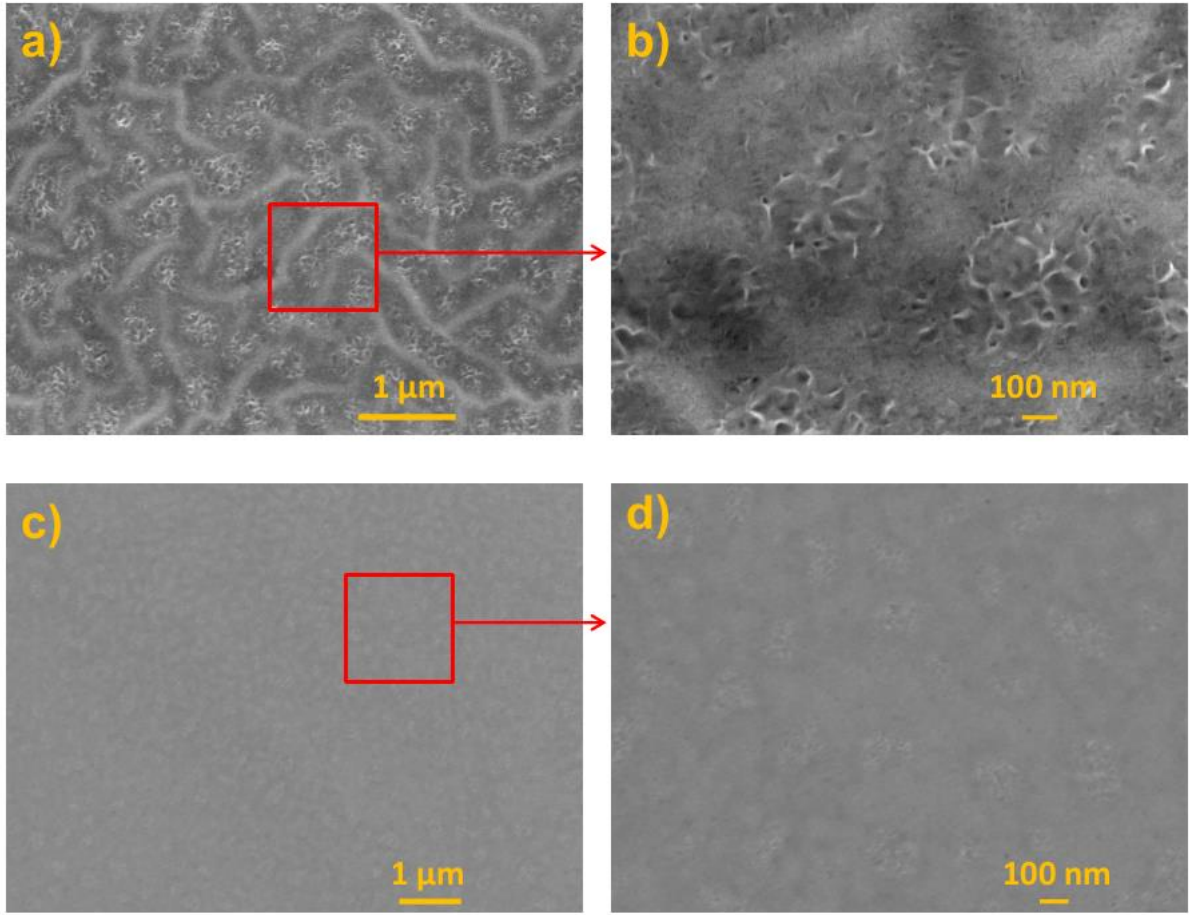
Üretilen numunelerin yüzey topografyasını incelemek için PbS kuantum nokta ince filmin  $2\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  yüzey alanı atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yardımı ile oda sıcaklığında tarandı. Elde edilen iki boyutlu (2D) AFM görüntüleri **Şekil 4**'te verilmiştir. Elde edilen AFM görüntüleri analiz edilerek, yüzey üzerine kaplanan PbS kuantum nokta yapılarının partikül ölçümü ve istatistikleri yapıldı. **Şekil 4**'te verilen AFM görüntüsü, alttaş yüzeyinin kuantum nokta ince film tabakası ile tamamen kaplandığını ve bu tabakanın homojen bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, topografya görüntüsünde yapılan analizler sonucunda PbS kuantum nokta ince film yapısının yüzey ortalama karekök pürüzlülüğü (*Root mean square (RMS) roughness*) değeri 2.11 nm olarak ölçüldü. Bunlara ek olarak, partikül ölçümü istatistikleri yardımıyla analiz edilen kuantum nokta ince filmin yüzeyindeki partikül boyutlarının bakılan bölgede ki ortalamasının 0.5 nm ile 1.0 nm aralığında değiştiği ve en büyük partikül büyüklüğünün yaklaşık olarak 2.0 nm olduğu hesaplandı.



**Şekil 4:** Organik kalıntılardan arındırılmış PbS kuantum nokta ince film için elde edilen **a)** iki boyutlu (2D) Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) görüntüsü, **b)** yüzey analizi ve **c)** partikül boyut analizi.

Şekil 5'te üretilen PbS ince filmler için elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5 (a) ve Şekil 5 (b)'de organik atıkları yapıdan uzaklaştırma işlemi yapılmadan önceki kuantum nokta ince filmlerin düşük ve yüksek büyütme SEM mikro görüntüleri ve Şekil 5 (c) ve Şekil 5 (d)'de ise kaplanan kuantum nokta ince film örneklerinin metanol ile yıkama ve ardından vakumlu fırın içerisinde  $1 \times 10^{-3}$  mbar'dan daha düşük basınç değerinde  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 1 saat süreyle ısıtılma işlemi uygulandıktan sonraki düşük ve yüksek büyütme SEM mikro görüntüleri görülmektedir. Yıkama işlemi yapılmadan önce numuneler üzerindeki organik yapıların yüzey üzerinde bir tabaka oluşturduğu ve kuantum noktaların yüzey üzerinde düzgün bir şekilde dağılmasını engellediği görülmektedir. Ayrıca, PbS kuantum noktaların üretiminde kullanılan oleik asitin (*oleic acid*) ince film kaplama işlemi esnasında kuantum noktaların yüzey üzerinde dağılımını engelleyerek çok küçük delikler (*pinhole*) oluşmasına sebep olduğu görülmektedir (Şekil 5 (b)). Organik atıkları uzaklaştırma işleminde kullanılan metanol, Şekil 5 (c) ve Şekil 5 (d)'de de görüldüğü gibi üretilen ince filmler üzerinde oleik asitin oluşturduğu tabakayı çözerek yapıdan uzaklaşmasını sağlamıştır. Bununla beraber, üretilen kuantum nokta ince filmlerin metanol ile yıkanarak organik atıkların yapıdan uzaklaştırılması ve sonrasında düşük basınç altında  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 1 saat süreyle ısıtılma maruz bırakılması PbS kuantum noktaların sıcaklık etkisi ile yüzey üzerinde boşlukları dolduracak şekilde homojen dağılmasını ve yüzeyde yıkama öncesi gözlenen çok küçük deliklerin kapanmasını sağladığı görülmektedir (Şekil 5 (d)).





**Şekil 5:** PbS kuantum nokta ince filmlerin; yapı içerisindeki organik kalıntıları uzaklaştırma işlemi yapılmadan önce elde edilen **a)** düşük büyütme ve **b)** yüksek büyütme ve yapıdaki organik kalıntılar uzaklaştırmak için örneklerin metanol ile yıkanıp ve ardından vakumlu fırın içerisinde  $1 \times 10^{-3}$  mbar'dan daha düşük basınç değerinde  $110$  °C sıcaklıkta 1 saat ısıtma işlemi uygulanması sonrasında elde edilen **c)** düşük büyütme ve **d)** yüksek büyütme taramalı elektron mikroskopu (SEM) mikro görüntüleri.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, son yıllarda hızla gelişen kuantum nokta güneş hücrelerinin en önemli tabakalarından biri olan kuantum nokta ince film aktif tabakasının üretimi için dönele kaplama yöntemi ile üretilmesi ve sonrasında karakterizasyonu, kuantum nokta güneş hücreleri alanında araştırmalar yapmak isteyen bilim insanlarına yol gösterici olması için tüm aşamalar ayrıntılı bir biçimde ele alındı. PbS kuantum nokta ince filmler dönele kaplama yöntemi kullanılarak iyi temizlenmiş soda-kireç silikat camlar üzerine başarıyla üretildi. Üretilen ince filmlerin optik özellikleri soğurma (*absorbsiyon*) spektroskopisi ve fotoluminesans (*PL*) emisyon spektroskopisi kullanılarak analiz edildi. Soğurma spektroskopisi sonuçlarına göre, PbS kuantum noktalar kullanılarak üretilen ince filmlerin elektromanyetik spektrumun yakın kızılötesi (*near-IR*) bölgesinde ve  $1.24$  eV ile  $2.06$  eV arasındaki geniş bir aralıkta soğurma yaptığı görüldü. En yüksek soğurmanın olduğu dalga boyu değerinin  $730$  nm olduğu tespit edildi. *PL* emisyon spektroskopisi ile ince filmlerin emisyon yaptığı enerji değerinin dalga boyu  $915$  nm civarında bir değere karşılık gelen  $1.35$  eV değerinde olduğu gözlemlendi. PbS kuantum nokta ince filmlerin yapısal yüzey karakterizasyonu için Raman spektroskopisi, AFM ve SEM teknikleri kullanıldı. Eş odaklı Raman spektroskopisi sonucunda, PbS yapısındaki  $76$   $\text{cm}^{-1}$  ve  $471$   $\text{cm}^{-1}$ 'de sırayla PbS yapısının enine optik modu (*TO*) ve boyuna optik modu (*LO*) gözlemlendi. AFM kullanılarak analiz edilen kuantum nokta ince filmlerin yüzey ortalama kare kök pürüzlülüğü değeri  $2.11$  nm ve partükül boyutlarının ortalamasının  $0.5$  nm ile  $1.0$  nm aralığında değiştiği

hesaplandı. SEM mikro görüntülerinde ise, üretilen kuantum nokta ince filmlerin metanol ile yıkama işlemi yapılmadan önce yüzeyinde gözlenen organik tabak ve çok küçük deliklerin (*pinhole*), yıkama işlemi ve ısıl işlem sonrası tabakanın uzaklaştığı ve kuantum noktaların yüzey üzerinde homojen bir şekilde dağılarak kaybolduğu görülmüştür. AFM yüzey analizi ile SEM mikro görüntüleri beraber incelendiğinde, her iki analizden elde edilen sonuçların birbirini desteklediği görülmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A.P. Alivisatos, Perspectives on the Physical Chemistry of Semiconductor Nanocrystals, *J. Phys. Chem.* 100 (1996) 13226–13239. <https://doi.org/10.1021/jp9535506>.
- [2] S.I. Pokutnyi, Exciton states in quasi-zero-dimensional semiconductor nanosystems, *Semiconductors.* 46 (2012) 165–170. <https://doi.org/10.1134/S1063782612020194>.
- [3] T. Chakraborty, *Quantum Dots: A survey of the properties of artificial atoms*, Elsevier, Amsterdam, 1999.
- [4] O.A.A. Ekimov A. I., Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals, *JETP Lett.* 34 (1981) 345–348.
- [5] L. Chen, Y. Jiang, C. Wang, X. Liu, Y. Chen, J. Jie, Green chemical approaches to ZnSe quantum dots: preparation, characterisation and formation mechanism, *J. Exp. Nanosci.* 5 (2010) 106–117. <https://doi.org/10.1080/17458080903314022>.
- [6] U. Serincan, H.K. Mutlu, K. Mustafa, Kuantum Nokta Ara Bant Oluşumlu Güneş Hücresinin Büyütülmesi, Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu, *J. Polytech.* 20 (2017) 565–569. <http://dergipark.gov.tr/politeknik/issue/33116/339365>.
- [7] C.B. Murray, D.J. Norris, M.G. Bawendi, Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites, *J. Am. Chem. Soc.* 115 (1993) 8706–8715. <https://doi.org/10.1021/ja00072a025>.
- [8] O.E. Semonin, J.M. Luther, S. Choi, H.-Y. Chen, J. Gao, A.J. Nozik, M.C. Beard, Peak External Photocurrent Quantum Efficiency Exceeding 100% via MEG in a Quantum Dot Solar Cell, *Science* (80-). 334 (2011) 1530–1533. <https://doi.org/10.1126/science.1209845>.
- [9] L. Brus, Electronic wave functions in semiconductor clusters: experiment and theory, *J. Phys. Chem.* 90 (1986) 2555–2560. <https://doi.org/10.1021/j100403a003>.
- [10] G. Bester, A. Zunger, Electric field control and optical signature of entanglement in quantum dot molecules, *Phys. Rev. B.* 72 (2005) 165334. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.165334>.
- [11] E. Muñoz, Z. Barticevic, M. Pacheco, Electronic spectrum of a two-dimensional quantum dot array in the presence of electric and magnetic fields in the Hall configuration, *Phys. Rev. B.* 71 (2005) 165301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.165301>.
- [12] S.M.B. Albahrani, T. Seoudi, D. Philippon, L. Lafarge, P. Reiss, H. Hajjaji, G. Guillot, M. Querry, J.-M. Bluet, P. Vergne, Quantum dots to probe temperature and pressure in highly confined liquids, *RSC Adv.* 8 (2018) 22897–22908. <https://doi.org/10.1039/C8RA03652G>.
- [13] A.J. Nozik, Quantum dot solar cells, *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures.* 14 (2002) 115–120. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(02\)00374-0](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(02)00374-0).
- [14] R.D. Schaller, V.I. Klimov, High efficiency carrier multiplication in PbSe nanocrystals: Implications for solar energy conversion, *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 186601–1. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.186601>.
- [15] a. J. Nozik, M.C. Beard, J.M. Luther, M. Law, R.J. Ellingson, J.C. Johnson, Semiconductor quantum

- dots and quantum dot arrays and applications of multiple exciton generation to third-generation photovoltaic solar cells, *Chem. Rev.* 110 (2010) 6873–6890. <https://doi.org/10.1021/cr900289f>.
- [16] S. Fafard, K. Hinzer, S. Raymond, M. Dion, J. McCaffrey, Y. Feng, S. Charbonneau, Red-Emitting Semiconductor Quantum Dot Lasers, *Science* (80-. ). 274 (1996) 1350–1353. <https://doi.org/10.1126/science.274.5291.1350>.
- [17] M. Grundmann, U. Richter, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, N. Kirstaedter, D. Bimberg, P. Werner, S.S. Ruvimov, N.N. Ledentsov, U. Gösele, Z.I. Alferov, J. Heydenreich, M.V. Maximov, Low threshold, large To injection laser emission from (InGa) as quantum dots, *Electron. Lett.* 30 (1994) 1416–1417. <https://doi.org/10.1049/el:19940939>.
- [18] S.A. McDonald, G. Konstantatos, S. Zhang, P.W. Cyr, E.J.D. Klem, L. Levina, E.H. Sargent, Solution-processed PbS quantum dot infrared photodetectors and photovoltaics., *Nat. Mater.* 4 (2005) 138–142. <https://doi.org/10.1038/nmat1299>.
- [19] G. Konstantatos, I. Howard, A. Fischer, S. Hoogland, J. Clifford, E. Klem, L. Levina, E.H. Sargent, Ultrasensitive solution-cast quantum dot photodetectors., *Nature.* 442 (2006) 180–183. <https://doi.org/10.1038/nature04855>.
- [20] C. Hu, D. Dong, X. Yang, K. Qiao, D. Yang, H. Deng, S. Yuan, J. Khan, Y. Lan, H. Song, J. Tang, Synergistic Effect of Hybrid PbS Quantum Dots/2D-WSe<sub>2</sub> Toward High Performance and Broadband Phototransistors, *Adv. Funct. Mater.* 27 (2017) 1603605. <https://doi.org/10.1002/adfm.201603605>.
- [21] K.-S. Cho, E.K. Lee, W.-J. Joo, E. Jang, T.-H. Kim, S.J. Lee, S.-J. Kwon, J.Y. Han, B.-K. Kim, B.L. Choi, J.M. Kim, High-performance crosslinked colloidal quantum-dot light-emitting diodes, *Nat. Photonics.* 3 (2009) 341–345. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.92>.
- [22] L. Qian, Y. Zheng, J. Xue, P.H. Holloway, Stable and efficient quantum-dot light-emitting diodes based on solution-processed multilayer structures, *Nat. Photonics.* 5 (2011) 543–548. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.171>.
- [23] K.-H. Lee, J.-H. Lee, W.-S. Song, H. Ko, C. Lee, J.-H. Lee, H. Yang, Highly Efficient, Color-Pure, Color-Stable Blue Quantum Dot Light-Emitting Devices, *ACS Nano.* 7 (2013) 7295–7302. <https://doi.org/10.1021/nn402870e>.
- [24] İ. Candan, Investigation on the incorporation of quantum dot thin film layers in the organic and inorganic solar cell structures, (PhD. Thesis), Middle East Technical University (METU), 2016. <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12619853/index.pdf>.
- [25] B.J. Moon, S. Cho, K.S. Lee, S. Bae, S. Lee, J.Y. Hwang, B. Angadi, Y. Yi, M. Park, D.I. Son, Quantum Dots: Enhanced Photovoltaic Performance of Inverted Polymer Solar Cells Utilizing Multifunctional Quantum-Dot Monolayers, *Adv. Energy Mater.* 5 (2015). <https://doi.org/10.1002/aenm.201570011>.
- [26] L. Yu, Z. Li, Y. Liu, F. Cheng, S. Sun, Mn-doped CdS quantum dots sensitized hierarchical TiO<sub>2</sub> flower-rod for solar cell application, *Appl. Surf. Sci.* 305 (2014) 359–365. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.090>.
- [27] S. Horoz, Cr Katkılı ZnS KuantumNoktalarının Karakterizasyonu ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi, *İğdır Univ. J. Inst. Sci. Technol.* (2018) 89–97. <https://doi.org/10.21597/jist.428315>.
- [28] Ç. Özada, Nükleer Görüntüleme Sistemlerinde Kuantum Noktaların Kullanılması, *Mühendis Beyinler Derg.* 1 (2016) 6–11. <http://dergipark.gov.tr/muhendis-beyinler/issue/17300/281347>.
- [29] C.E. Rowland, K. Susumu, M.H. Stewart, E. Oh, A.J. Mäkinen, T.J. O'Shaughnessy, G. Kushto, M.A. Wolak, J.S. Erickson, A. L. Efros, A.L. Huston, J.B. Delehanty, Electric Field Modulation of Semiconductor Quantum Dot Photoluminescence: Insights Into the Design of Robust Voltage-Sensitive Cellular Imaging Probes, *Nano Lett.* 15 (2015) 6848–6854. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02725>.

- [30] M. V. Yezhelyev, A. Al-Hajj, C. Morris, A.I. Marcus, T. Liu, M. Lewis, C. Cohen, P. Zrazhevskiy, J.W. Simons, A. Rogatko, S. Nie, X. Gao, R.M. O'Regan, In Situ Molecular Profiling of Breast Cancer Biomarkers with Multicolor Quantum Dots, *Adv. Mater.* 19 (2007) 3146–3151. <https://doi.org/10.1002/adma.200701983>.
- [31] T. Jin, Y. Imamura, Applications of Highly Bright PbS Quantum Dots to Non-Invasive Near-Infrared Fluorescence Imaging in the Second Optical Window, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 5 (2016) R3138–R3145. <https://doi.org/10.1149/2.0171601jss>.
- [32] J. Huang, S. Liu, L. Kuang, Y. Zhao, T. Jiang, S. Liu, X. Xu, Enhanced photocatalytic activity of quantum-dot-sensitized one-dimensionally-ordered ZnO nanorod photocatalyst, *J. Environ. Sci.* 25 (2013) 2487–2491. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60330-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60330-1).
- [33] X.-F. Shi, X.-Y. Xia, G.-W. Cui, N. Deng, Y.-Q. Zhao, L.-H. Zhuo, B. Tang, Multiple exciton generation application of PbS quantum dots in ZnO@PbS/graphene oxide for enhanced photocatalytic activity, *Appl. Catal. B Environ.* 163 (2015) 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.07.054>.
- [34] P.R. Brown, D. Kim, R.R. Lunt, N. Zhao, M.G. Bawendi, J.C. Grossman, V. Bulović, Energy Level Modification in Lead Sulfide Quantum Dot Thin Films through Ligand Exchange, *ACS Nano.* 8 (2014) 5863–5872. <https://doi.org/10.1021/nn500897c>.
- [35] F.W. Wise, Lead Salt Quantum Dots: the Limit of Strong Quantum Confinement, *Acc. Chem. Res.* 33 (2000) 773–780. <https://doi.org/10.1021/ar970220q>.
- [36] R.J. Ellingson, M.C. Beard, J.C. Johnson, P. Yu, O.I. Micic, A.J. Nozik, A. Shabaev, A.L. Efros, Highly Efficient Multiple Exciton Generation in Colloidal PbSe and PbS Quantum Dots, *Nano Lett.* 5 (2005) 865–871. <https://doi.org/10.1021/nl0502672>.
- [37] I. Moreels, D. Kruschke, P. Glas, J.W. Tomm, The dielectric function of PbS quantum dots in a glass matrix, *Opt. Mater. Express.* 2 (2012) 496. <https://doi.org/10.1364/ome.2.000496>.
- [38] H.İ. Yavuz, Design of High-Efficiency Dye-sensitized Nanocrystalline Solar Cells, (PhD. Thesis), Middle East Technical University (METU), 2014. <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12618106/index.pdf>.
- [39] İ. Candan, M. Parlak, Ç. Erçelebi, PbS quantum dot enhanced p-CIGS/n-Si heterojunction diode, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30 (2019) 2127–2135. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-0484-0>.
- [40] J. Tauc, Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si, *Mater. Res. Bull.* 3 (1968) 37–46. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(68\)90023-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(68)90023-8).
- [41] C. Liu, J. Heo, X. Zhang, J.-L. Adam, Photoluminescence of PbS quantum dots embedded in glasses, *J. Non. Cryst. Solids.* 354 (2008) 618–623. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.07.069>.
- [42] Z. Remes, T. Novak, J. Stuchlik, T. Stuchlikova, V. Dřinec, R. Fajgar, K. Zhuravlev, Infrared photoluminescence spectra of PBS nanoparticles prepared by the Langmuir-Blodgett and laser ablation methods, *Acta Polytech.* 54 (2014) 426–429. <https://doi.org/10.14311/AP.2014.54.0426>.
- [43] Y. Batonneau, C. Brémard, J. Laureyns, J.C. Merlin, Microscopic and imaging Raman scattering study of PbS and its photo-oxidation products, *J. Raman Spectrosc.* 31 (2000) 1113–1119. [https://doi.org/10.1002/1097-4555\(200012\)31:12<1113::AID-JRS653>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-4555(200012)31:12<1113::AID-JRS653>3.0.CO;2-E).
- [44] G. De Guidici, P. Ricco, P. Lattanzi, A. Anedda, Dissolution of the (001) surface of galena: An in situ assessment of surface speciation by fluid-cell micro-Raman spectroscopy, *Am. Mineral.* 92 (2007) 518–524. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2181>.

## Development of Graphical Interface Based Marble Classification Application

 Erhan TURAN<sup>1,\*</sup>  Beşir DANDIL<sup>2</sup>  Cafer BAL<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Havsan Robotik Ltd.Şti., 23100, Merkez/ELAZIĞ

<sup>2</sup> Firat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği, 23100,Merkez/ELAZIĞ

### Graphical/Tabular Abstract

This study focuses on the development of a graphical interface application that automates the marble classification process by removing it from the manual structure. The texture classification process of marbles is a problem that can be overcome by using image processing and machine learning-based technologies together. In the scope of the study, a graphical interface that classifies marbles automatically has been developed. The training set is created by extracting feature extraction of marble images classified with GUI. With classifiers using the training set, marble images of unknown class are classified without the need for expert staff. The main screenshot of the developed GUI is given in Figure A.

### Article Info:

Research article

Received: 29/10/2020

Revision: 16/12/2020

Accepted: 16/12/2020

### Highlights

- GUI based Classification
- ELM,SVM,DT,ANN
- Histogram, LBP,SIFT

### Keywords

Marble Classification  
 Feature Extraction  
 ML Based Classification  
 GUI Development

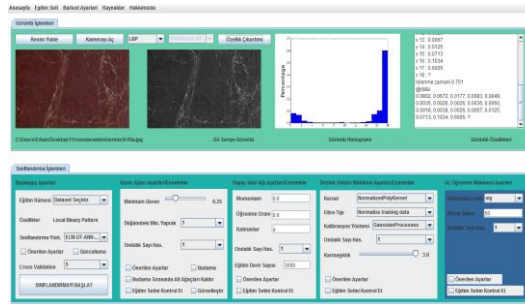


Figure A. GUI homepage

**Purpose:** Within the scope of the study, it was aimed to develop a system that automates the marble classification process by removing personnel dependency. Histogram, LBP and SIFT were examined in terms of feature extraction and added to the application. As the classification algorithm, Extreme Learning Machine (ELM), Decision Tree (DT), Support Vector Machine (SVM) and Artificial Neural Network (ANN) were examined and used in the application.

**Theory and Methods:** The two basic units of the marble classification process, feature extraction and classification, are explained step by step. The effect of input parameters used in classification algorithms on classification success is examined and given on the GUI. GUI can be a basis for industrial applications by giving software design architecture. Feature extraction processes are Python based, GUI and classification algorithms are developed based on Java. In the feature extraction process, advanced Python mathematical functions and Swing, Java's advanced interface development library, were used. In addition, by using Weka's Java library for classification functions, classification functions can be integrated into GUI in an easy and modular way.

**Results:** According to the proposed feature extraction and classification algorithms, by learning the images of marble species belonging to 4 different classes, 20 from each, 90-95% cross-verified classification results were achieved. After these results are obtained, the GUI 'design architecture has been removed and developed for the end user.

**Conclusion:** The developed GUI offers a solution to a big problem for industrial use. It is aimed to reach the most accurate result by determining the class according to the majority result by running 4 different classifiers simultaneously. If the features of the marble image whose class is determined do not meet the company's criteria, the training set development module developed on the GUI can be automatically added to the training set with its class and features. This enables training sets to be created that provide higher classification performance without any workload.

GU J Sci, Part C, 8(4): 1034-1050 (2020)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Grafiksel Arayüz Tabanlı Mermer Sınıflandırma Uygulaması Geliştirme

Erhan TURAN<sup>1</sup> Beşir DANDIL<sup>2</sup> Cafer BAL<sup>2</sup> <sup>1</sup> Havsan Robotik Ltd.Şti., Merkez/ELAZIĞ<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği, Merkez/ELAZIĞ

### Öz

Mermerlerin dokularına göre sınıflandırma işlemi, uzmanlık gerektiren kişisel görüşe dayalı manuel bir işlemdir. Uzman personel işletme içinde belirlenen ölçütlere göre mermeri renk, homojenlik ve dokusuna göre sınıflandırmaktadır. Personel kaynaklı yanlış sınıflandırma işleminden dolayı firma ekonomik ve ticari itibar kaybına uğrayabilmektedir. Bu çalışmada makine öğrenme tabanlı mermer sınıflandırma Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface - GUI) uygulaması geliştirilmiştir. GUI üzerinde görüntülerin özellik çıkarımı için Yerel İkili Örüntü (Local Binary Pattern- LBP), Histogram ve Ölçekten Bağımsız Özellik Dönüşüm (Scale Invariant Feature Transform- SIFT) yöntemleri kullanılmıştır. Sınıflandırma işleminde ise Uç Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine-ELM), Karar Ağacı (Decision Tree- DT), Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine- SVM) ve Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network- ANN) kullanılarak toplu sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen GUI ile eğitim işlemi yapıldıktan sonra sınıfı bilinmeyen mermerin türü uzman personele ihtiyaç duyulmadan saniyeler içerisinde belirlenebilmektedir. Bu çalışma, mermer sınıflandırma uygulama yazılımı olarak endüstriye uygulanması açısından temel araştırmalardan birini oluşturmaktadır.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 29/10/2020  
Düzeltilme: 16/12/2020  
Kabul: 16/12/2020

### Anahtar Kelimeler

*Mermer Sınıflandırma*  
*Özellik Çıkarımı*  
*ML Sınıflandırma*  
*GUI*

### Keywords

*Marble Classification*  
*Feature Extraction*  
*ML Classification*  
*GUI*

## Development of Graphical Interface Based Marble Classification Application

### Abstract

According to texture, making a classifying of marbles is a manual process expert person's ideas based requiring experience. Expert personnel classifies the marble according to its color, homogeneity, and texture according to the criteria determined within the enterprise. The company may lose its economic and commercial reputation due to the misclassification process caused by personnel. In this study, a machine learning based marble classification Graphical User Interface (GUI) application has been developed. Local Binary Pattern (LBP), Histogram and Scale Invariant Feature Transform (SIFT) methods were used for feature extraction of images on the GUI. In the classification process, collective classification was performed using the Extreme Learning Machine (ELM), Decision Tree (DT), Support Vector Machine (SVM) and Artificial Neural Network (ANN). After the training process is done with the developed GUI, the type of marble of unknown class can be determined in seconds without the need for expert staff. This study has been constituted one of the basic researches in terms of application to the industry as a marble classification application software.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde başta inşaat sektörü olmak üzere birçok farklı sektörde değişik amaçlarla kullanılmakta olan mermer, katı halde geçirdikleri değişiklik sonucunda kalker ve dolomit bileşenlerin uzun yıllar içerisinde bir araya gelerek oluşturduğu doğal ve eşsiz bir taştır. Mermeri traverten ve granit gibi doğal taşlardan üstün kılan en önemli özellik, değişken miktarlarda barındırdığı organik ve inorganik bileşenler sayesinde eşsiz dokulara sahip olmasıdır [1]. Eşsiz dokulara sahip olmasından dolayı yapılara estetik bir görüntü vermektedir. Mermerlerin uygulama alanında, görsel bütünlüğü oluşturan parçaların kullanılması istenmektedir. Benzer mermerleri ayırmak için mermer plakalar sınıflandırma işlemine tabii tutulmaktadır.

Mermer sınıflandırma işlemi, işletmelerde geleneksel olarak uzman personelin kararına göre yapıldığından genel geçer bir yapıya sahip değildir. Ayrıca uzmanın bilgi ve deneyimine bağlı olarak, verdiği kararların

yavaş ve hatalı olma olasılığı yüksektir. Bu durum endüstride önemli maddi ve geri dönülemez itibar kayıplarına neden olabilmektedir. Endüstriyel mermer sınıflandırmada geleneksel olarak kullanılan yöntemlerle ortaya çıkabilecek kayıplara engel olabilmek için, günümüzde insan hatalarını azaltmaya yönelik çalışmalar yoğunluk kazanmaktadır. Bu çalışmada, insan kaynaklı hataları minimize etmek, sınıflandırma süresini bir saniyeye kadar düşürebilmek, bütün ticari işletmelerde kabul gören genel geçer bir sınıf etiketi belirlemek ve personel kaynaklı aksamaları engellemek amaçlarına yönelik olarak yapay zeka tabanlı bir GUI'ye sahip bir uygulama geliştirilmiştir. Bu GUI'ye sahip program sayesinde, uzman olmayan personelin dahi saniyeler içinde sınıfı bilinmeyen mermeri en doğru kümeye yerleştirmesi amaçlanmıştır.

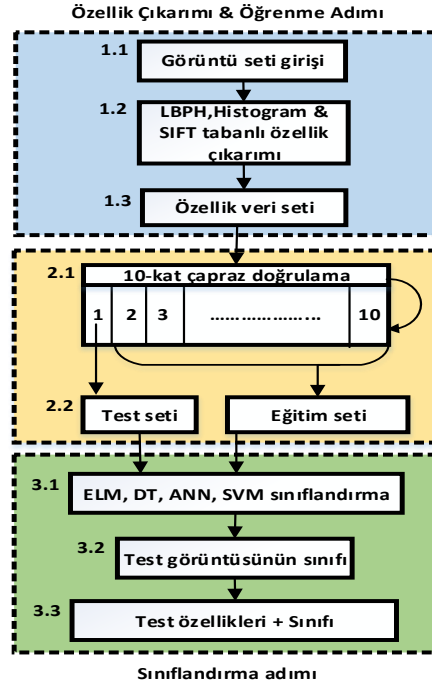
Literatürde mermer sınıflandırma işlemini otomatikleştirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar daha çok, otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve deneysel yazılım üzerine yoğunlaşmaktadır. Otomasyon tabanlı mermer sınıflandırma çalışmalarında, Programlanabilir Mantık Denetleyici (Programmable Logic Controller-PLC) kullanan endüstriyel uygulamalar önerilmiştir [2, 3]. PLC tabanlı mermer sınıflandırma konveyör hattının deneysel çalışması yapılmıştır [2]. Ayrıca PLC, gerçek bir mermer fabrikasındaki konveyör bandına entegre edilerek mermer sınıflandırma işleminde kullanılmıştır [3]. Mermer sınıflandırma işlemi sırasıyla özellik çıkarımı ve sınıflandırma adımları olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki, mermeri sayısal olarak tanımlayabilmek için özellik çıkarımının yapılmasıdır. Özellik çıkarımından sonraki ikinci aşamada ise, veri seti kullanılarak sınıflandırma fonksiyonu oluşturulur. Özellik çıkarım işlemi, görüntünün pikselleri arasındaki ilişkileri tanımlayabilmek için geliştirilen algoritmaların çıktısıdır. Düşük hafıza tüketimi ve hızlı hesaplama özelliğinden dolayı LBP özellik çıkarım yöntemi mermer, granit, ahşap veya tekstil malzemelerinin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [4-6]. Ayrıca LBP özellik çıkarımı kullanılarak aynı türdeki mermerleri seleksiyonlarına ayıran bir çalışma gerçekleştirilmiştir [7]. Bu çalışmada, ELM sınıflandırıcısıyla birlikte LBP, SIFT özellik çıkarım yöntemine göre daha başarılı yüksek sonuçlar üretebildiği gösterilmiştir [7]. Özellik çıkarımında, hızlı olması ve komşu pikseller arasındaki ilişkinin incelenbilmesinden dolayı Histogram tabanlı özellik çıkarım yöntemi de kullanılmaktadır [8]. Özellik çıkarım yöntemlerinden elde edilen özellik verileri ile sınıflandırma fonksiyonu haline getiren yapay zeka tabanlı sınıflandırma algoritmaları kullanılmaktadır. SVM sınıflandırıcısı dokuların sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [12, 13]. ANN' ler giriş ve çıkış hücreleri olan, sınıflandırma ve kümeleme algoritması olarak da kullanılmıştır [14]. Bir başka çalışmada, mermer görüntülerinin bulanık karınca kümeleme ve ANN kullanılarak sınıflandırma başarımı karşılaştırılmıştır [15]. Yine SVM sınıflandırıcısı mermer görüntüsüne benzeyen dilimlenmiş kuru jambonu sınıflandırmak için kullanılmıştır [16]. Mermer sınıflandırma işlemini tamamen otomatikleştirmek için kontrolcülere ihtiyaç duyulmaktadır. PLC kontrolcüsü kullanılarak mermer sınıflandırma işleminin gerçek zamanlı yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır [17, 18].

Bu çalışma kapsamında, mermer sınıflandırma işlemini gerçekleştiren algoritmalar kullanılarak son kullanıcıya yönelik deneysel bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulama üzerinde çoklu özellik çıkarımı ve çoklu sınıflandırıcı kullanılarak mermer sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Histogram, LBP ve SIFT özellik çıkarım yöntemlerini, DT, SVM, ANN ve ELM ise sınıflandırıcıları oluşturmaktadır. Bu yöntemler uygulama üzerinde paralel bir şekilde kullanılarak en başarılı sonucun tespit edilmesi sağlanmıştır. Sınıflandırıcıların paralel çalışması ile işlemci ve hafızadan kazanç elde edilerek düşük donanım seviyelerinde bile yüksek başarımlar hedeflenmiştir. Ayrıca GUI' nin önemli özelliklerden biri de test görüntüsünün özellikleriyle sınıfını birleştirilerek eğitim kümesine otomatik bir şekilde eklenmesidir. Böylece daha kapsamlı bir veri seti işletme bünyesinde ilave bir maliyet oluşturmadan elde edilecektir. GUI ile birlikte mermer sınıflandırma işlemi öznal yapıdan çıkarılarak genel geçer bir yapıya dönüştürülerek literatüre kazandırılmıştır.

Bu çalışmanın takip eden bölümleri şu başlıklar altında açıklanmıştır: Bölüm 2' de, önerilen yöntemin metodolojisi özetlenmiştir. Bölüm 3 ve 4' te sırasıyla özellik çıkarımı ve sınıflandırma aşamaları detaylandırılmıştır. Bölüm 5' te veri yapısı hakkında özet bilgiler sunulmaktadır. Bölüm 6' da GUI çalışmasının akış şeması ve uygulaması anlatılmıştır. Son bölümde ise sonuçların değerlendirilmesi ve gelecekteki çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

## 2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Mermer sınıflandırma uygulaması sırasıyla özellik çıkarım işlemi ve sınıflandırma fonksiyonunun üretilmesiyle gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen GUI üzerinden eğitim ve sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Denetimli mermer görüntüleri sisteme GUI üzerinden seçilerek uygulamaya tanıtılır. Bu çalışmada sınıflandırma için ELM, DT, ANN, SVM algoritmaları kullanılmıştır. Eğitim kümesi oluşturma işleminde ise Histogram, LBP ve SIFT tabanlı özellik çıkarım yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen mermer sınıflandırma işleminin akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Önerilen mermer sınıflandırma sistemi akış şeması

Şekil 1’de verilen mermer sınıflandırma işleminin akış şemasında, özellik çıkarım işlemi ve sınıflandırma işlemleri anlatılmıştır. Görüntü seti girişi uygulama üzerinden seçilmektedir. Mermer sınıflarına ait görüntüler sınıf isimleri belirten klasör adlarıyla birlikte uygulama üzerinden seçilerek özellik çıkarımına başlanılmaktadır. Görüntülerin boyutları uygulamadan seçilmeden önce aynı boyuta getirilerek standart bir yapıya dönüştürülmelidir. Çalışma kapsamında 10-kat çapraz doğrulama yöntemine göre sınıflandırma başarımları ölçülmüştür. Bu yöntemde eğitim seti 10 parçaya bölünerek sırasıyla her bir parça test için geriye kalanı ise eğitim için ayrılmaktadır. Bu işlem sırasıyla bütün parçaların test verisi olarak kullanılmasıyla sona ermektedir. Eğitim kümesi için ayrılan verilerden sınıflandırma fonksiyonları oluşturulduktan sonra test için ayrılanlar bu sınıflandırma fonksiyonları üzerinde test edilir. Test sonucu sınıflandırma fonksiyonunun başarımını gösterir. Şekil 1’de verilen akış şemasının işlem adımları sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

- Görüntü kümesine LBP ve Histogram özellik çıkarım işlemi uygulanır. Özellik çıkarım işlemi sonucunda görüntülerin özellikleri dosyaya kaydedilerek eğitim kümesi elde edilir.
- Histogram ve LBP eğitim seti ayrı ayrı 10 parçaya ayrılarak 10-kat çapraz doğrulama için uygun hale getirilir.
- Sınıflandırma aşamasında çapraz doğrulama için hazır hale getirilen eğitim kümesiyle sınıflandırıcı eğitilir. Test verisiyle de test işlemi gerçekleştirilir. Test işleminin başarımlarının ortalaması sınıflandırma başarımını vermektedir.



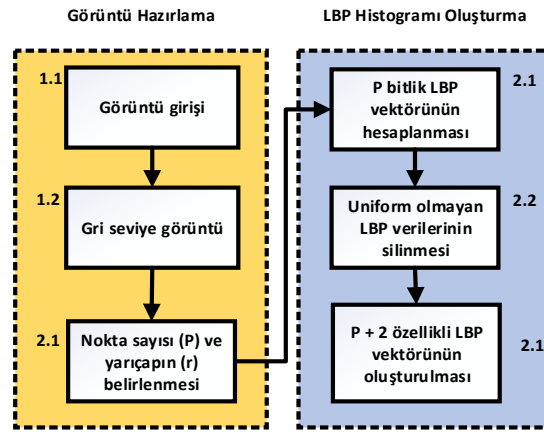
### 3. ÖZELLİK ÇIKARIMI (FEATURE EXTRACTION)

Görüntüyü oluşturan renklerin geometrik bir şekilde diziliminden meydana gelen dokular, görüntü sınıflandırma işlemlerinde görüntüleri birleştirici ve ayırıcı etkiye sahiptir. Dokuyu oluşturan renkler, görüntünün frekans, faz, rasgelelik, tekdüzelik, yoğunluk ve doğrusallık özelliklerini içerir. Özellik çıkarımı aşamasında mermer görüntülerine sayısal değerlerden oluşan etiketler atanır. Görüntünün özelliklerinden oluşan eğitim kümesi sınıflandırma ve kümeleme işlemlerinde kullanılır. Geliştirilen GUI'de LBP, Histogram ve SIFT özellik çıkarım yöntemleri kullanılmıştır.

#### 3.1. LBP Tabanlı Özellik Çıkarımı (LBP Based Feature Extraction)

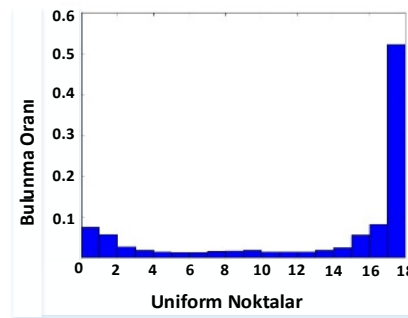
LBP detektörü yüksek başarılı bir doku tanımlayıcısıdır. Doku sınıflandırma ve kümeleme işlemlerinde kullanılmaktadır. LBP, dokunun ayırt edici önemli özelliklerini çıkartır. Önemli noktalar histogram üzerinde birleştirilerek özellik vektörü oluşturulur.

LBP detektörü görüntünün her bir noktası için komşuluk vektörü oluşturmaktadır. Komşuluk vektörü, merkez noktanın etrafında bulunan noktalarla ilişkisini belirtir. Özellik histogramının akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. LBP detektörü akış şeması

Şekil 3'te  $P=16$ ,  $R=4$  değerlerine sahip örnek bir LBP histogramı verilmiştir.  $P$  merkez etrafındaki ilişkili nokta sayısını,  $R$  ise merkezin yarıçapını belirtir.  $P$  noktasının büyük olması hassasiyeti arttıracak gibi orantılı olarak işlem süresini de artırır.  $R$ 'nin büyük olup olmaması ise küçük dokulara olan hassasiyeti azaltabilmektedir.  $P$  ve  $R$  değeri için en uygun yöntem, deneme yanılma yoluyla en uygun değerler tespit edilmesidir.



Şekil 3. Rosso - Levanto sınıfına ait örnek bir mermerin LBP histogramı

Şekil 3'te verilen histogramda,  $x$  düzlemindeki her bir nokta görüntünün LBP tabanlı özelliğini oluşturmaktadır. Her  $x$  değerine karşılık gelen  $y$  değeri ise tekdüze noktalar içerisinde o gruba ait noktaların bulunma sıklığını gösterir.

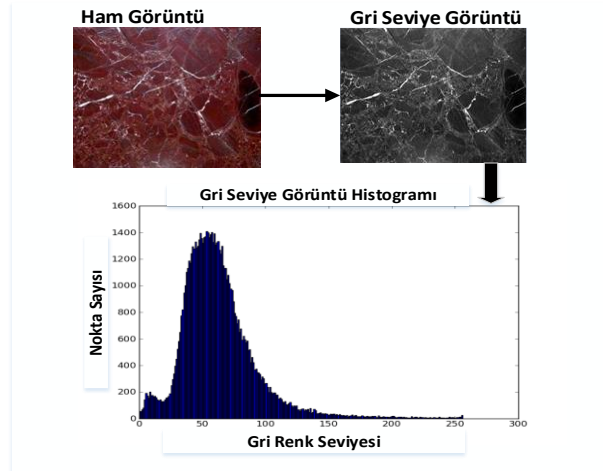
### 3.2. Histogram Tabanlı Özellik Çıkarımı (Histogram Based Feature Extraction)

Mermerin dokusunu sayısal olarak tanımlayabilmek için kullanılan özellik çıkarım işlemlerinden biri de histogram tabanlı özelliklerdir. Birinci dereceden histogram tabanlı özellikler 'Ortalama', 'Varyans', 'Çarpıklık', 'Basıklık', 'Enerji' ve 'Entropi' dir. İkinci dereceden histogram tabanlı özellikler ise 'Zıtlık', 'Enerji', 'Homojenlik' ve 'Korelasyon' dur. Histogram tabanlı özellik çıkarımı için görüntü gri seviyeye çevrilir. Gri seviye Histogramı renk düzeylerini içeren toplam nokta sayısını verir. Histogramın uygulama aşamaları, aşağıda adım adım verilmiştir.

- Görüntünün boyutu A x B şeklinde ifade edilir.
- 2 boyutlu görüntü fonksiyonu  $f(x, y)$  ve  $x=0, 1, 2, \dots, A$ ,  $y=0, 1, 2, \dots, B$  şeklinde tanımlanır.
- Her  $f(x, y)$  fonksiyonu için  $i=0, 1, 2, \dots, G$ 'ye kadar gri renk seviyesini belirtir.
- Her piksel 8 bit ile ifade edildiğinden, maksimum  $G=2^8=256$  şeklinde işlem görür.
- Histogram da herhangi bir renk düzeyinin görüntüde bulunan toplam sayısı  $h(i)$  şeklinde gösterilir. Örnek olarak " $h(137)=60$ " işlemi 137. gri seviyesinden, görüntüde toplam 60 noktanın olduğunu belirtir.
- Histogram üzerindeki gri renk seviyesinin yoğunluğunu ifade eden  $p(i)$  değeri denklem (2)'de verilmiştir.

$$p(i)=h(i)/(A \times B) \quad (2)$$

İşlenmemiş görüntü gri seviye görüntüye dönüştürüldükten sonra histogram alma işlemi gerçekleştirilir. Histogram oluşturma işlemi aşamalı olarak Şekil 4'te verilmiştir.



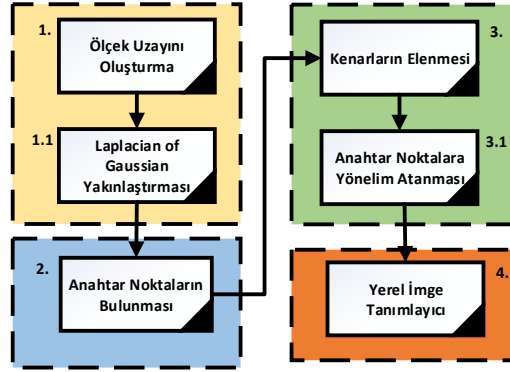
Şekil 4. Histogram oluşturma işlemi

### 3.3. SIFT Tabanlı Özellik Çıkarımı (SIFT Based Feature Extraction)

SIFT detektörü farklı görünüşler arasında güvenilir eşleştirme gerçekleştirmek için kullanılabilecek bir anahtar nokta tanımlayıcısıdır [7]. Bu anahtar nokta tanımlayıcısı dögüsel, boyutsal, parlaklık, ölçek ve gürültüye karşı dirençli olduğundan yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. SIFT detektörü aşamalı bir şekilde gerçekleşen dört adımdan oluşur.

- Ölçek uzayındaki uç değer noktaların tespiti
- Anahtar noktaların bulunması
- Yönelimlerin belirlenmesi
- Anahtar nokta tanımlayıcıları

Yukarıda ardışık gerçekleşen dördüncü adımın sonunda özellik tanımlayıcıları elde edilir. Bu adımları gerçekleştiren akış şemasının adımları farklı renklerle ifade edilerek Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. SIFT detektörü akış şeması

#### 4. SINIFLANDIRMA İŞLEMİ (CLASSIFICATION PROCESS)

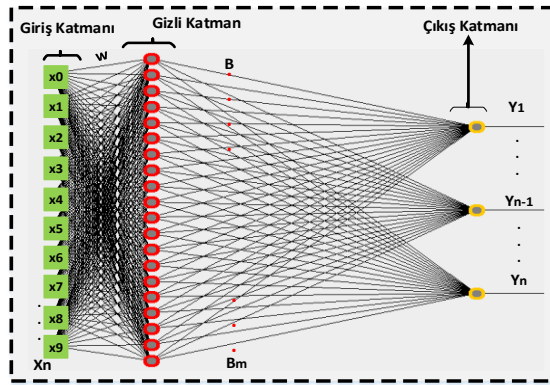
Mermer görüntülerini sınıflandırabilmek için görüntü özelliklerini öğrenerek sınıflandırma fonksiyonları üreten sınıflandırıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle en başarılı sınıflandırma sonucunun elde edilip değerlendirilmesi için ELM, KA, ANN ve SVM yöntemleri kullanılmıştır. Bu sınıflandırıcıların giriş parametreleri GUI üzerinden değiştirilerek en başarılı sonuçların üretilmesi sağlanmıştır.

##### 4.1. ELM Sınıflandırıcısı (ELM Classifier)

Huang ve ekibi tarafından önerilen ELM, tek katmanlı ileri beslemeli bir ANN modeli için kullanılan öğrenme algoritmasıdır [9-10]. Bu çalışmada kullanılan ELM, test edilen görüntünün özelliklerini kullanabilen, ileri beslemeli statik öğrenmeli bir yapıya sahiptir. ELM, ANN' ye göre ağırlık noktalarının atanması ve değiştirilmesi yönünden farklılık göstermektedir. Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıda özetlenmiştir:

1. Çok hızlı bir şekilde eğitim işlemi gerçekleştirilir.
2. ANN yapısına göre daha az hafıza tüketimi sağlar.
3. Sistemin eğitilmesi için az sayıda parametreye ihtiyaç duyulur. Bu durum geliştiriciler için kolaylık sağlar.
4. Ara katmandaki hücre sayısının ve aktivasyon fonksiyonun belirlenmesinde kesin bir yöntemin bulunmaması en önemli dezavantajıdır.

ELM mimarisi, ANN mimarisine benzese de çalışma şekilleri farklıdır. ELM de girişler ile ara katman arasındaki ( $w$ ) ağırlık değerleri rasgele atanır; ayrıca ilerleyen aşamada güncellenmez. Ara katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlık değeri ( $\beta$ ) analitik bir şekilde ve tek bir seferde hesaplanarak elde edilir. ELM mimarisinin hücre ve katman yapısı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. ELM katman mimarisi

Ara katmandaki hücre sayısı, kullanıcının isteği ve veri yapısına göre atanır. ELM' de giriş ağırlıkları rastgele üretilirken, çıkış ağırlıkları tek bir çevrimde analitik yöntemler ile hesaplanır. Bu yöntem ile eğitim süreci ANN sınıflandırıcısına göre daha hızlı şekilde sınıflandırmayı tamamlamaktadır [7,9].

#### 4.2. Karar Ağacı Sınıflandırıcısı (Decision Tree Classifier)

DT, belirsizliğin en düşük olduğu kuralları tespit ederek, eğitim kümesinin sınıflandırılmasını sağlar. Hesapsal işlem maliyeti düşük olduğundan birçok alanda kullanılmaktadır [11]. DT, kural oluşturma algoritması olarak böl ve yönet yaklaşımını kullanır. DT'de kullanılan eğitim setindeki bütün veriler sınıfların ve özelliklerin dağılımından bağımsızdır [11]. Bu nedenle DT'nin çalışması için, verilerin normalizasyona tabi tutulması zorunlu değildir. Karar ağaçlarında düğümleri oluşturan kural çıkarımıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

**C4.5:** Bu algoritma denetimli sayısal verilere sahip, eğitim kümesi üzerinden işlem görmektedir. C4.5 algoritması sayısal verileri sınıflandırılarak nominal değerlere dönüştürdükten sonra ID3 yöntemine göre çalışmasını tamamlar [10]. Aşağıdaki adımlar takip edilerek hesaplanmaktadır.

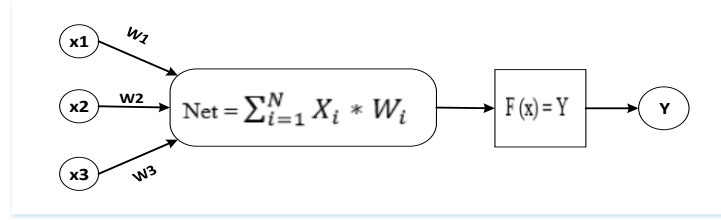
1. Eşik değeri bilgi kazancını belirlemek için girilir.
2. Herhangi bir özelliğin sayısal değerlerini V değeri belirtmektedir. Eşik değeri  $t_i$  şeklinde belirtilir. V değerleri sıralanarak ortanca elaman bulunur ve i değeri ortanca elamanın indisidir.
3. 
$$t_i = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}$$
4. Sayısal değerler eşik değeri olan  $t_i$  ye göre, kategorilendirilerek nominal değerlere dönüştürülür. Bu aşamadan sonra kategorilendirilmiş eğitim kümesine, ID3 algoritması uygulanarak DT oluşturulur.

LBP ve Histogram tabanlı eğitim kümesinin C4.5 tabanlı karar ağaçları oluşturulmuştur. Karar ağaçlarının test başarısı, çapraz doğrulama yöntemine göre deneysel sonuçlar bölümünde verilmiştir.

#### 4.3. Yapay Sinir Ağı Sınıflandırıcısı (Artificial Neural Network Classifier)

ANN, insan beyninin öğrenme, çözümlenme, regresyon analizi gibi yeteneklerinin matematiksel yapıya aktarılmasını amaçlayan sistemdir. ANN ile insan beyninin matematiksel olarak modellenmesi amaçlanmıştır. ANN sınıflandırıcısı kendi kendini geliştirebilme, sabit kaynak tüketimi, işlevsellik ve karar hızı bakımından verimli olduğundan birçok alanda kullanılmaktadır [14]. Eğitim işlemi sırasında ağ yapısına göre ayırt edici davranışlar sergileyebilirler. ANN modeli oluşturulmadan önce problemin iyi analiz edilmesi gerekir. Problemin girişi ve çıkışı arasındaki bağlantı iyi analiz edilirse, ağa verilecek parametreler başarı için belirleyici olabilmektedir.

ANN temelde beş alt birimden oluşur. Bu birimler girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu (birleştirme fonksiyonu), aktivasyon fonksiyonu ve hücre çıkışı olarak ifade edilir. ANN hücre modeli Şekil 7'de verilmiştir.



**Şekil 7.** ANN hücre modeli

ANN, verilerden çıkışlar elde ettikten sonra, bu çıkışları istenilen sonuç ile karşılaştırır. Eğer sonuçlar istendiği gibi değilse hatayı ağırlıkların güncellenmesini sağlar. Bu şekilde hata eşik değerinin altına düşene kadar öğrenme işlemi devam ettirilir. ANN’deki bu işlem, insan beyninin zamanla tecrübe kazanma özelliğinden gelmektedir [14-15]. ANN’ nin ağırlıklarını, hedeflenen çıkışa ulaşana kadar güncellemesi, öğrenme süreci olarak ifade edilir. Uygulamada ileri beslemeli tek ara katmanlı ve geri yayımlı bir ANN modeli kullanılmıştır. Ara katmandaki hücre sayısı manuel ve otomatik olarak girilebilmektedir. Otomatik seçeneğinde ara katmandaki hücre sayısı (giriş özelliklerinin sayısı + sınıf sayısı) / 2 şeklinde hesaplanmaktadır.

#### 4.4. Destek Vektör Makinesiyle Sınıflandırma (Support Vector Machine Classifier)

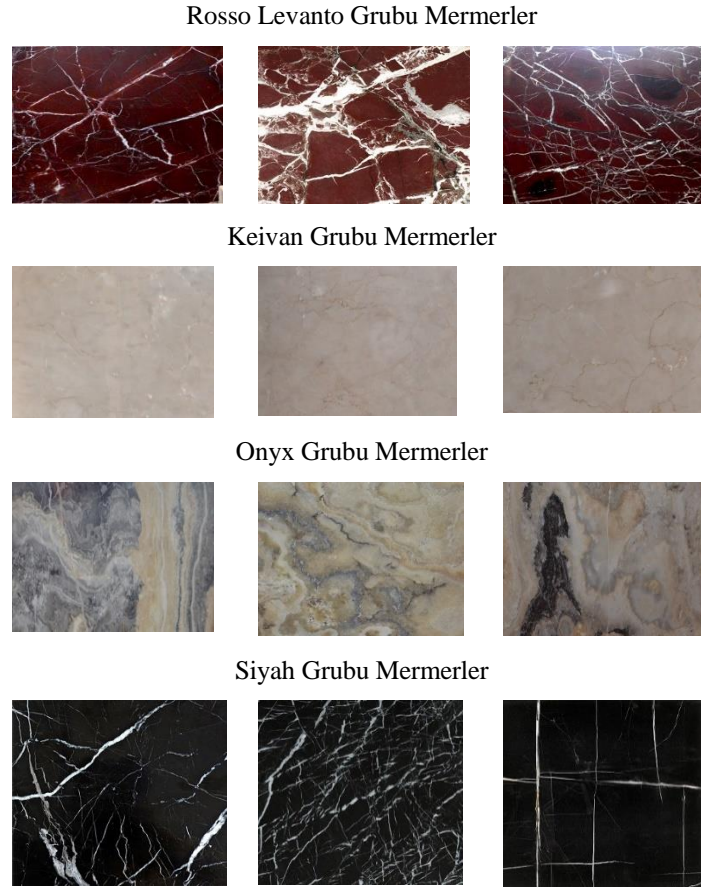
SVM verileri sınıflandırırken, sınıflar arası birbirine en yakın noktaları tespit ederek, bu noktaları ayıran fonksiyona dik uzaklığı maksimum yapmayı hedefler. Ayrıca sınıfları ayıran fonksiyonu oluştururken, bütün sınıflara eşit mesafede olmasını amaçlar. Doğrusal olarak ayıramayan verilerde çekirdek tipi değiştirilerek veriler sınıflandırılabilir. Temelinde ikili sınıflandırma olmasına rağmen çoklu sınıflandırma işlemini de gerçekleştirebilir [12].

SVM sınıflandırma fonksiyonunun doğrusallık ve çekirdek tipine göre belirlenmektedir. Veri kümesi doğrusal olarak ayrılabilirse doğrusal çekirdek kullanılmalıdır. Veri kümesi doğrusal olarak ayrılmazsa Gauss, Hiperbolik, Polinomal ve Puk gibi doğrusal olmayan çekirdekler ile sınıflandırma yapılır.

Filtre tipi, eğitim kümesini düzenleyerek daha başarılı sınıflandırma fonksiyonlarının üretilmesini sağlar. Normalize filtre tipinde eğitim kümesindeki veriler belli bir aralığa çekilerek sınıflandırma fonksiyonu oluşturulur. Standardize filtre tipinde ise veriler olasılıksal değerleri üzerinden işlem görür. Bu çalışmada çekirdek ve filtre tipleri değiştirilerek mermerlerin sınıflandırma başarısı test edilmiştir.

### 5. VERİ YAPISI (DATA STRUCTURE)

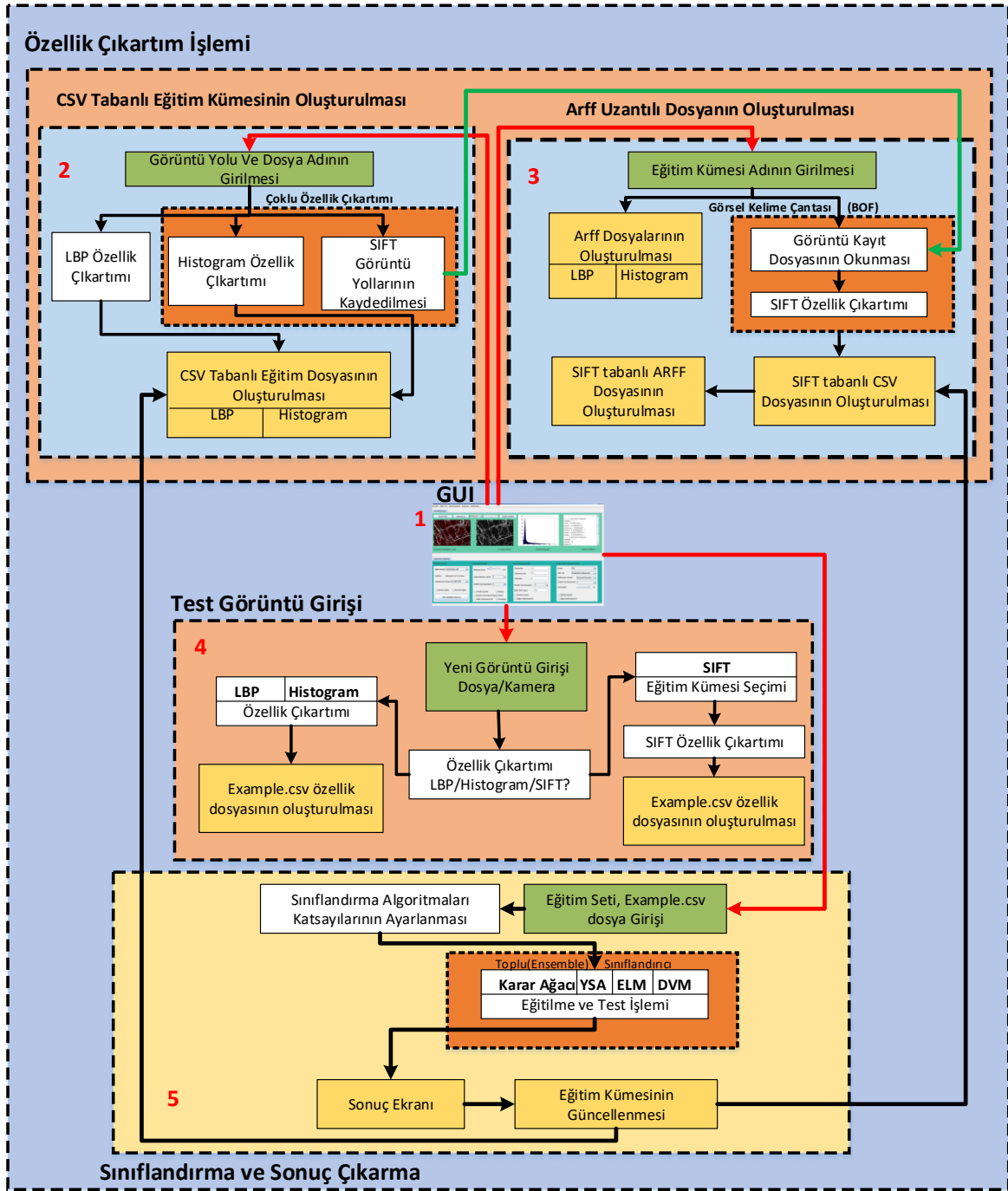
Önerilen mermer sınıflandırma çalışmasındaki, mermer görüntüleri üretim yapan çeşitli firmalardan temin edilmiştir. Görüntüler 320x240 piksellik sabit boyuta ölçeklenmiştir. Eğitim kümesi, Rosso Levanto, Keivan, Onyx ve Siyah mermer türlerinin her birinden 20 tane olmak üzere toplam 80 görüntüden oluşmaktadır. Eğitim kümesindeki mermer görüntüleri kendi adlarıyla etiketlenmiştir. Örnek mermer türlerinin görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir.



*Şekil 8. Eğitim kümesinde kullanılan mermer grupları*

## 6. GRAFİKSEL ARAYÜZ (GRAPHICAL USER INTERFACE)

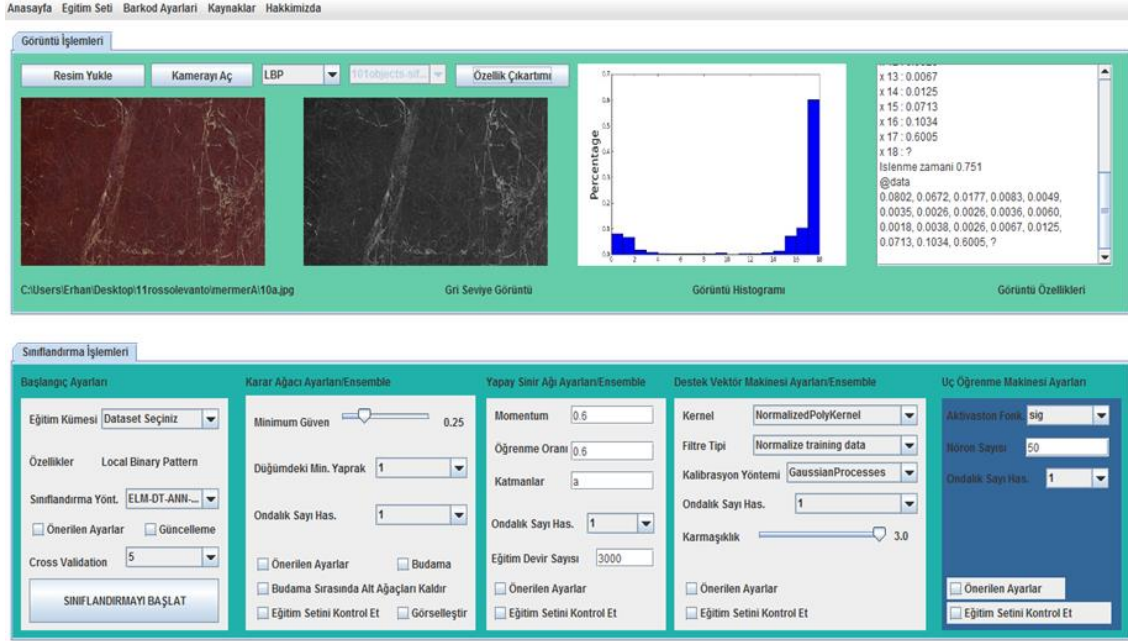
GUI, Model Arayüz Kontrol (Model View Controller-MVC) yapısında son kullanıcıya yönelik geliştirilmiştir. Bu çalışmada, GUI'nin bütün birimleri ayrı ayrı sınıflar halinde geliştirilerek nesne tabanlı mimari kurulmuştur. Böylece GUI üzerinde yapılacak olan geliştirme, güncelleme ve bakım maliyetlerinin en düşük seviyede tutulması sağlanmıştır. GUI mimarisinin, her bir alt birimi numaralandırılarak Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. GUI akış şeması

Bu çalışmada, sistemin tamamı GUI üzerinden yönetilebilir. GUI kullanıcıyla görsel iletişimin yanı sıra alt birimler arasındaki iletişimi de sağlar. Alt birimler GUI üzerinden dosyalar ve değişkenler şeklinde tanımlanan hafıza birimleri üzerinden haberleşir. Şekil 9'da verilen birimlerin çalışma yöntemleri adım adım aşağıda açıklanmıştır.

**GUI:** Uygulamanın merkezi işlem birimi olarak kabul edilir. Sadece alt birimleri yönetmenin yanı sıra kendi üzerinde bulunan sanal hafıza birimleriyle akış kontrolü sağlar. GUI başlangıç ekranı Şekil 10'da verilmiştir.

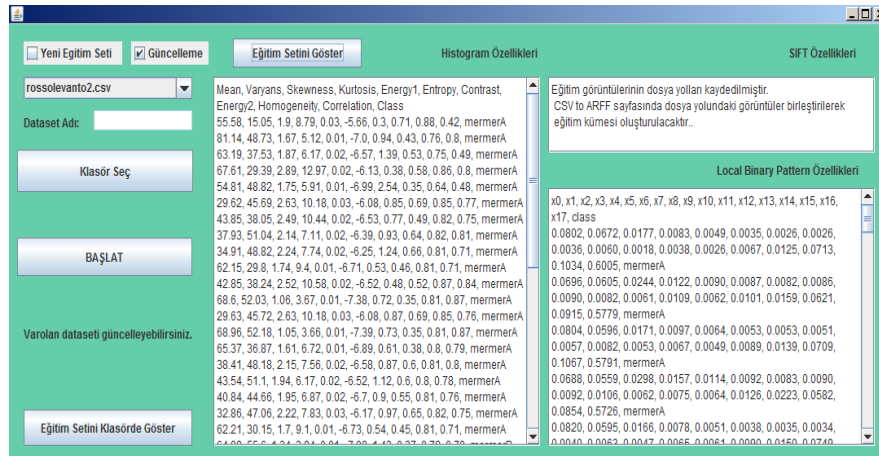


Şekil 10. GUI ana sayfa

Şekil 10’da belirtilen görüntü işlemleri bölümünde, kameradan veya hafızadan görüntü yükleme işlemi gerçekleştirilebilir. Görüntü yüklendikten sonra LBP, histogram veya SIFT tabanlı özellik çıkarımı yapılması için seçim yapılır. Yapılan özellik seçimine göre, test görüntüsünün özellikleri sınıflandırma algoritmaları için uygun dosya biçimine dönüştürülür.

**CSV tabanlı eğitim kümesinin oluşturulması:** Sisteme mermer görüntülerinin tanıtılması gerekmektedir. Bu işlem ikinci bölümde açıklanan özellik çıkarım işlemlerinin yapıldığı menüdür. Şekil 9’deki bütün işlemler GUI tarafından başlatılarak denetimi sağlanır. Bu alt birim görüntünün dosya yolunu ve özelliklerin kaydedileceği dosya adını parametre olarak alır.

Görüntülerin bulunduğu klasörün adı, görüntülerin sınıfı olarak kabul edilir. Dosya yolundaki görüntüler sırasıyla “feature-lbp.py” ve “feature-hist.py” adlı uygulamalarda okunarak, özellikleri “csv” uzantılı dosyalara kaydedilir. Bu uygulamalar ile sadece LBP ve histogram tabanlı özellikler elde edilir. SIFT tabanlı özellikler, kelime çantası modeline dönüştürülmesi gerektiğinden, bu menüde oluşturulamaz. Eğitim kümesindeki bütün elamanların, anahtar noktalarından oluşan SIFT tabanlı histogram üzerinden kümeleme yapılarak kelime çantası modeli oluşturulur. Dolayısıyla bütün sınıflara ait örneklerin aynı anda okunması gerekmektedir. Bu işlem bu menüde yapılamayacağından sınıflara ait görüntülerin yolları bir sonraki menüde kullanılmak üzere dosyaya kaydedilir. Bu işlemlerin gerçekleştirildiği menü Şekil 11’de verilmiştir.



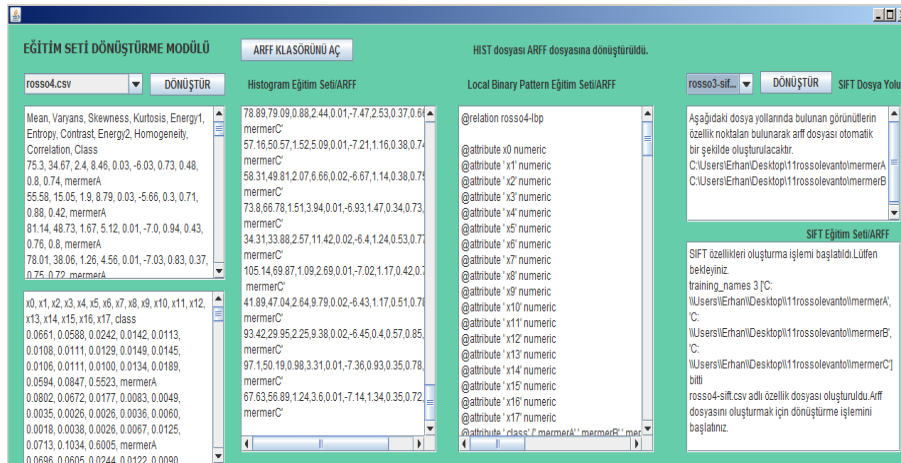
Şekil 11. CSV tabanlı özellik çıkarım menüsü



Şekil 11’de, LBP ve histogram tabanlı özelliklerin elde edilmesi gösterilmiştir. Uygulamada yeni bir eğitim seti oluşturma veya eğitim seti güncelleme işlemi yapılabilir. Yeni eğitim seti oluşturulduğunda eğitim seti adının girilmesi gerekir. Güncelleme yapıldığında ise istenilen eğitim seti seçilmelidir. “Klasör Seç” butonu ile görüntü yolu seçilir. “Başlat” butonuna basıldığında, seçili görüntü yolundaki görüntülerin özellikleri elde edilerek “csv” dosyasına kaydedilir. Daha sonra aynı eğitim kümesine farklı bir sınıf eklemek için güncelleme işlemi yapılması gerekmektedir. Bu işlemlerden sonra, “Başlat” butonuna tekrar basıldığında aynı eğitim setine yeni sınıflardan oluşan görüntülerin özellikleri eklenerek güncellenecektir. Aynı zamanda SIFT için tutulan dosya yollarının bulunduğu dosyada güncellenecektir. “Eğitim Setini Göster” butonuna basıldığında ise eğitim setinin tamamı okunarak kullanıcıya gösterilir.

**Arff Uzantılı dosyanın oluşturulması:** Uygulamanın eğitim kümesini şekil yönünden tanıması için “arff” uzantılı dosya biçimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dosya tipi Weka tabanlı bir dosyadır. Doğrudan Weka kütüphanesinin fonksiyonları kullanılarak okunur. LBP, histogram ve SIFT tabanlı özellikler ayrı ayrı dosyalarda tutulur. Dolayısıyla bu dosyaların ayrı ayrı “arff” dosya tipine dönüştürülmesi gerekmektedir. CSV tabanlı eğitim kümesinin oluşturulması işleminde sadece LBP ve histogram tabanlı özellikler elde edilmiştir. SIFT tabanlı eğitim kümesinin, “csv” dosyası bu bölümde oluşturulacaktır. SIFT özelliklerinin “csv” dosyası oluşturulduktan sonra “arff” dosya tipine dönüştürülecektir.

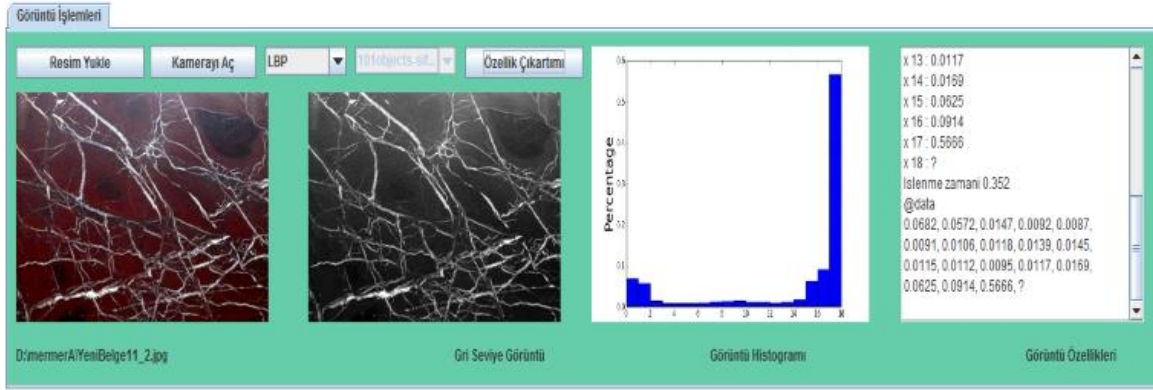
LBP ve histogram tabanlı “csv” dosyasının, “arff” dosyasına dönüştürülmesi ve SIFT özelliklerinin çıkarılarak “csv” dosyasının oluşturulması, paralel yapılır. Bu işlemler birbirinden bağımsız olduğundan Java’nın iş parçacığı (Thread) yapısı kullanılarak eşzamanlı çalıştırılır. Dolayısıyla işlem süresi kısalmır. Bu işlemlerin gerçekleştirildiği menü Şekil 12’de verilmiştir.



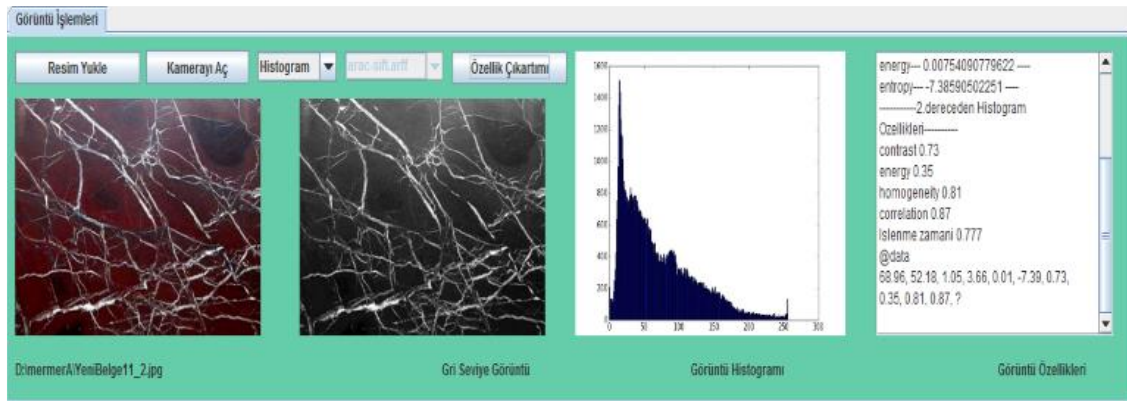
Şekil 12. CSV’ den Arff dosya türüne dönüştürme menüsü

Şekil 12’de verilen menü açılırken sistemde kayıtlı “csv” dosyaları taranarak seçenek kutusuna otomatik bir şekilde yerleştirir. Kullanıcı “Dönüştür” butonuna basmadan önce seçenek kutusundan eğitim setini seçmelidir. Dönüştürme işlemi başladıktan sonra LBP ve Histogram dosyasının “arff” dosyası ile aynı eğitim setinin SIFT tabanlı “csv” dosyası oluşturulur. SIFT tabanlı “csv” dosyası oluşturduktan sonra menünün sağındaki seçenek kutusu da aktifleşir. SIFT tabanlı “csv” dosyası, menünün sağındaki “Dönüştür” butonuyla “arff” dosyasına dönüştürülür.

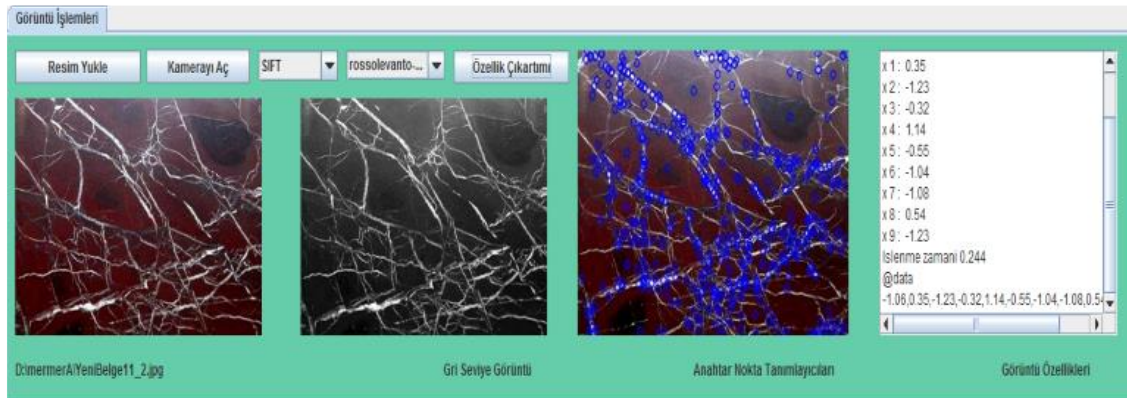
**Test görüntü girişi:** Yeni görüntü girişi Şekil 8’de verilen akış şemasının dördüncü adımında gerçekleşir. Uygulamaya hafızadan veya kameradan görüntü girişi yapılabilir. Kameradan görüntü girişi deneysel olarak geliştirilmiştir. Yeni görüntü girişi yapıldıktan sonra üç tip özellik çıkarım işlemi uygulanabilir. LBP tabanlı özellik çıkarımında, gri seviye görüntüdeki tekdüze noktaların histogramı çıkarılır. Histogram tabanlı özellik çıkarımında, görüntü gri seviyeye çevrildikten sonra histogramı elde edilir. Histogram üzerinden sayısal özellikler hesaplanır. SIFT tabanlı özellik çıkarımı için görsel kelime çantasının oluşturulması gerekmektedir. Bu görsel kelime çantası k-Ortalama ile kümelenecek on kümeyle ayrılır. Yeni görüntünün özellikleri bu on kümeyle olan vektörel uzaklıklarla ifade edilir. Bu yüzden test görüntüsünün SIFT tabanlı özellikleri için SIFT tabanlı eğitim setinin seçilmesi gerekir. Test görüntüsünün özellik çıkarım işlemi Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15’te ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 13. LBP tabanlı özellik çıkarımı



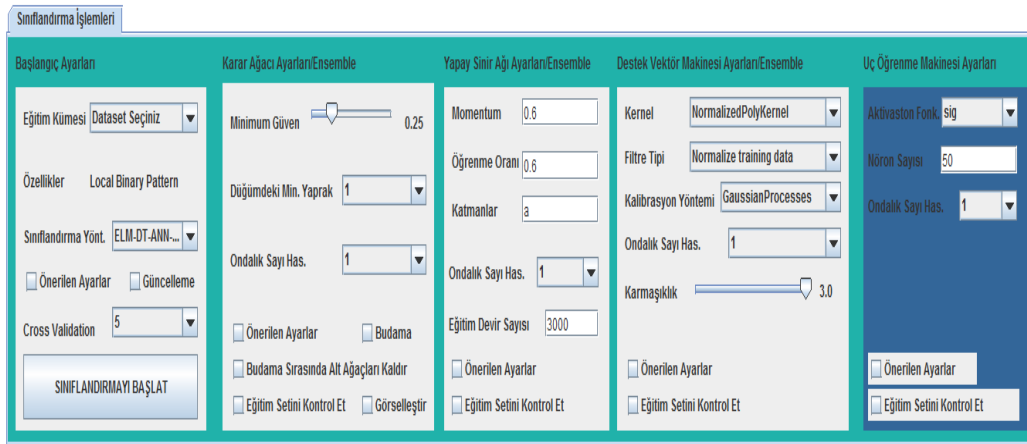
Şekil 14. Histogram tabanlı özellik çıkarımı



Şekil 15. SIFT tabanlı özellik çıkarımı

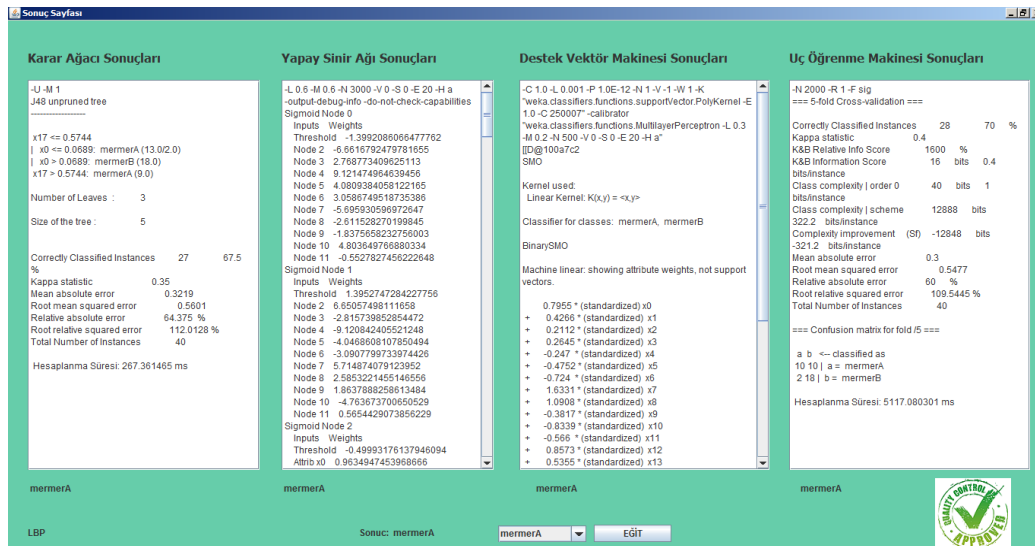
Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'te görüldüğü gibi test görüntüsünün özellik çıkarım işlemleri ayrı ayrı gerçekleştirilir. LBP, histogram ve SIFT tabanlı özellik çıkarımının birlikte denemesinin amacı doğruluk derecesini arttırmaktır. Mermer doğal bir taştır. Bütün mermer yüzeyleri benzersizdir. Bu yüzden LBP ve histogram tabanlı özellikler sınıflandırma için elverişlidir.

**Sınıflandırma ve sonuç çıkarma:** Eğitim kümesi ve test kümesinin özellikleri kullanılarak, sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. Eğitim kümesi, sınıflandırma algoritmalarına verilerek öğrenme işlemi gerçekleştirilir. Sınıflandırma algoritmaları üzerinden test görüntüsünün özellikleri test edilir. Uç öğrenme makinesi, Karar ağacı, Yapay sinir ağı ve Destek vektör makinesi kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. Bu sınıflandırma algoritmaları paralel bir şekilde çalışarak sonuç üretir. Sınıflandırma işlemi ayarlarının yapıldığı menü Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Sınıflandırma ayar menüsü

Şekil 16’da verildiği gibi sınıflandırma algoritmalarının ayarları aynı menü üzerinden yapılmaktadır. “Başlangıç Ayarları” kısmında eğitim kümesi seçim alanı mevcuttur. “Sınıflandırmayı Başlat” butonuna basıldığında girilen ayarlarla birlikte eğitim kümesi ve test görüntüsünün özellikleri sınıflandırma algoritmalarına verilir. Sınıflandırma algoritmaları işleme aynı anda başlayarak sonuç üretmeye çalışır. Uygulama bütün sınıflandırma algoritmalarının sonuçlarını ürettiğini algıladığında sonuç gösterim sayfasını başlatır. Sınıflandırma algoritmalarının “Önerilen Ayar” bölümü zaman kazancını göz ardı ederek en doğru sonucu elde etmek için otomatik bir şekilde sınıflandırma algoritmalarının ayarlar. Kullanıcının isteği doğrultusunda “Önerilen Ayarlar” işlemi sınıflandırma algoritmalarının tamamına veya istenildiği kadar algoritma uygulanabilir. Sonuç menüsü Şekil 17’de verildiği gibidir.

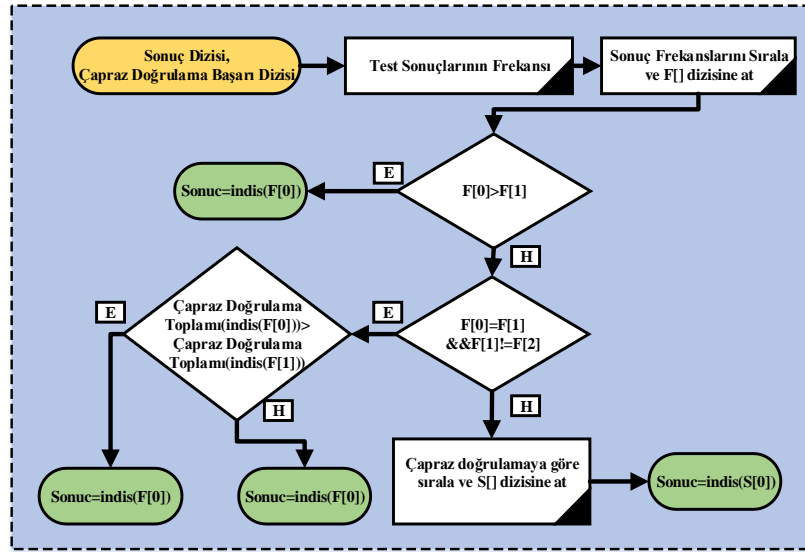


Şekil 17. Sonuç sayfası

Şekil 17’de verilen sonuç sayfasında sınıflandırma algoritmalarının fonksiyon değerleri ve test görüntüsünün sonuçları hesaplanmıştır. Sonuç sayfası, test görüntüsünün sınıfını, sınıflandırma algoritmalarının hesaplama süresini ve çapraz doğrulamalı başarı oranını gösterir.

Sınıflandırma algoritmaları test görüntüsü için farklı sonuçlar üretebilir. Sistem, sınıflandırma algoritmaları arasında yapılacak oylamaya göre genel sonuca karar verir. Bu oylama sonucunda hangi sınıf sayısı fazla ise uygulama ona göre seçim yapar. Uygulamada sadece bütün algoritmaların sonucu aynı çıkarsa, kalite kontrol logosu gösterilir. Kesin sonuç çıkarımı için farklı senaryolar mevcuttur. Birden fazla sınıfa ait eğitim kümesinde her bir sınıflandırma algoritması farklı sonuç verebilir. Bu durumda doğruluk oranı fazla olan algoritmanın verdiği sonuç dikkate alınır. Aynı zamanda bütün sınıflandırma algoritmalarının farklı

sonuçları aynı başarıyla verdiği düşünülürse içlerinden birine öncelik atanabilir. Sonuç çıkarma işleminin algoritması Şekil 18’de verildiği gibidir.



Şekil 18. Sonuç karar algoritması

LBP özellikleriyle, sınıflandırma işlemi gerçekleştirildikten sonra kesin olmayan sonuçlar ortaya çıkabilir. Kesin sonuca ulaşmak için histogram ve SIFT algoritmalarına göre aynı işlemler tekrarlanır.

LBP, histogram ve SIFT tabanlı sınıflandırma sonuçları belirsizlik içeriyorsa bu durum uygulama tarafından kullanıcıya bildirilir. Kullanıcı, mermerin sınıfını çıkan sonuçlara göre yanlış olduğuna karar verirse, bu mermeri sisteme tanıtarak öğrenmesini sağlayabilir. Sonuç sayfasında, eğitim kümesinde bulunan herhangi bir sınıf test görüntüsüne atanabilmektedir. “EĞİT” butonuna basıldığında görüntünün özellikleri ile birlikte sınıf bilgisi eğitim kümesine eklenir. Böylece aynı görüntü tekrar sisteme geldiğinde sınıflandırma algoritmaları bu görüntüyü tanıyarak doğru sonucu üretebilecektir.

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Geleneksel olarak yapılan mermer sınıflandırma işlemi, uzman personel görüşüne dayanan öznel bir işlemdir. Sınıflandırma işleminin personel kaynaklı olması zaman ve ekonomik açıdan kayıplara neden olmaktadır. Mermerlerin yanlış sınıflandırılması ticari ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Belirtilen nedenlerden dolayı bu çalışma ile mermer sınıflandırma işlemi, öznel yapıdan çıkarılarak genel geçer yapıya dönüştüren GUI geliştirilmiştir. Eğitim kümesi için görüntü kümesine Histogram, LBP ve SIFT tabanlı özellik çıkarım işlemleri uygulanmıştır. Önerilen sınıflandırma yöntemi olarak ELM, KA, ANN ve SVM kullanılmıştır. Çoklu sınıflandırıcı ve özellik çıkarımıyla birlikte daha doğru sınıflandırma sonucuna ulaşılması sağlanmıştır. Uygulama ile mermer görüntüleri sisteme tanıtıldıktan sonra yeni mermer görüntüsünün sınıfı belirlenebilmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, GUI yazılımı gömülü sistem üzerinde çalışabilir hale getirilebilir. Gömülü sistem üzerinde çalışan bir GUI, sanayi ortamında daha etkin şekilde kullanılabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Arıkan., "Türkiyede Mermercilik," Bilimsel Madencilik Dergisi, vol. Cilt 2,Sayı 7, 1962.
- [2] M. A. Selver, O. Akay, F. Alim, S. Bardakci, and M. Olmez, "An automated industrial conveyor belt system using image processing and hierarchical clustering for classifying marble slabs," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 27, pp. 164-176, Feb 2011.

- [3] J. Martinez-Alajarin, J. D. Luis-Delgado, and L. M. Tomas-Balibrea, "Automatic system for quality-based classification of marble textures," *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C-Applications and Reviews*, vol. 35, pp. 488-497, Nov 2005.
- [4] X. Y. Bian, C. Chen, Q. Du, and Y. X. Sheng, "Extended Multi-Structure Local Binary Pattern for High-Resolution Image Scene Classification," *2016 Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Igarss)*, pp. 5134-5137, 2016.
- [5] V. T. Hoang, A. Porebski, N. Vandenbroucke, and D. Hamad, "LBP parameter tuning for texture analysis of lace images," *2016 Second International Image Processing, Applications and Systems (Ipas)*, 2016.
- [6] F. Lopez, J. M. Valiente, R. Baldrich, and M. Vanrell, "Fast surface grading using color statistics in the CIE lab space," *Pattern Recognition and Image Analysis, Pt 2, Proceedings*, vol. 3523, pp. 666-673, 2005.
- [7] E. Turan, F. Ucar, B. Dandıl, , "Local Binary Patterns and Extreme Learning Machine based Texture Classification of Marbles," *IDAP*, 2018.
- [8] Parlak, K.Ş., Turan, E., Real-Time Classification of Marbles with Decision-Tree Method. *19th International Conference on Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering (ICECECE)*, 2017
- [9] G.-B. Huang, Zhu, Q.-Y. and Siew, C.-K, "Extreme learning machine: theory and applications," *Neurocomputing* 70(1), 489–501., 2006.
- [10] H. Açıkgoz, İ. Poyraz, and R. Çöteli, "IEEE 14-Baralı Güç Sisteminde Gerilim Kararlılığının Uç Öğrenme Makinesi İle Analizi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 7, no. 3, pp. 564–575, 2019.
- [11] J. R. Quinlan, "Programs for Machine Learning," Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [12] M. Peker and O. Özkaraca, "Büyük ölçekli veri setleri için GPU hızlandırılmalı melez bir GA-SVM: Cu-GA-SVM," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 6, no. 3, pp. 581–591, 2018.
- [13] N. V. Mankar, A. Khobragade, and M. M. Raghuvanshi, "Classification of Remote Sensing Image Using SVM Kernels," *2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave)*, 2016.
- [14] A. Gülcü and Z. Kuş, "Konvolüsyonel Sinir Ağlarında Hiper-Parametre Optimizasyonu Yöntemlerinin İncelenmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 7, no. 2, pp. 503–522, 2019.
- [15] K. A. Greenhow and C. G. Johnson, "Regioned Downsample for ANN Image Classification," *2015 Sai Intelligent Systems Conference (Intellisys)*, pp. 793-797, 2015.
- [16] S. M. Vieira, J. M. C. Sousa, and J. R. C. Pinto, "Ant based fuzzy modeling applied to marble classification," *Image Analysis and Recognition, Pt 2*, vol. 4142, pp. 90-101, 2006.
- [17] M. H. Liu, J. Shen, and J. H. Zhao, "Classification of Beef Marbling by Image Processing," *2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing (Apcip 2009)*, Vol 2, Proceedings, pp. 7-10, 2009.
- [18] I. Topalova and A. Tzokev, "Automated Texture Classification of Marble Shades with Real-Time PLC Neural Network Implementation," *2010 International Joint Conference on Neural Networks Ijcn 2010*, 2010.