



Yeni Bir Tam Karmaşık Doğrusal Olmayan Adaptif Sonlu Darbe Cevaplı Filtre Algoritması

Engin Cemal MENGÜÇ

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51245, Merkez/NİĞDE

Öz

Bu çalışmada, doğrusal olmayan karmaşık-değerli sinyaller için karmaşık-değerli doğrusal olmayan en küçük ortalama kurtosis (CNLMK) tabanlı yeni bir tam karmaşık doğrusal olmayan adaptif sonlu darbe cevaplı (FIR) filtre algoritması önerilmektedir. Önerilen doğrusal olmayan adaptif FIR filtre algoritmasının başarımı, karmaşık-değerli sinyallerin tahmini üzerinde test edilmiştir. Ayrıca önerilen algoritmanın başarımı, ortalama kare hata (MSE) ve tahmin kazancı cinsinden karmaşık-değerli doğrusal olmayan eğim düşüm (CNGD) algoritması ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları önerilen CNLMK algoritmanın, CNGD algoritmasından daha üstün bir başarımla sergilediğini açık bir şekilde ortaya koymuştur.

Makale Bilgisi

Başvuru: 20/05/2018

Düzeltilme: 21/09/2018

Kabul: 25/10/2018

Anahtar Kelimeler

FIR filtre

CNLMK algoritması

Tahmin

Karmaşık-değerli sinyaller

Keywords

FIR filter

CNLMK algorithm

Prediction

Complex-valued signals

A Novel Fully Complex Nonlinear Adaptive Finite Impulse Response Filter Algorithm

Abstract

In this study, a new fully complex nonlinear adaptive finite impulse response (FIR) filter algorithm based on the complex-valued nonlinear least mean kurtosis (CNLMK) is proposed for nonlinear complex-valued signals. The performance of the proposed nonlinear adaptive FIR filter algorithm is assessed on the prediction of complex-valued signals. In addition, the performance of the proposed algorithm is compared with the complex-valued nonlinear gradient descent (CNGD) algorithm in terms of the mean square error (MSE) and the prediction gain. Simulation results clearly demonstrate that the proposed CNLMK algorithm outperforms the CNGD algorithm.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Adaptif filtreler belirlenmiş bir maliyet fonksiyonunu kendi ağırlık katsayılarını güncelleyerek minimize eden filtre tipleridir. Bu özelliklerinden dolayı birçok sinyal işleme uygulamasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [1-3]. Pratik uygulamalarda, genellikle sinyaller reel ve karmaşık-değerli sinyaller olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Reel-değerli sinyaller sadece genlik bilgisi taşırken, karmaşık-değerli sinyaller hem yön hem de şiddet bilgisine sahip olan sinyallerdir [2]. Literatürde yer alan çalışmalarda, genellikle sinyallerin genlik bilgisiyle ilgilenildiğinden tasarlanan adaptif filtre algoritmaları reel düzlemde tasarlanmıştır ve karmaşık-değerli sinyalleri doğrudan kullanılacak bir forma sahip değildirler [2]. Yön ve şiddet bilgisi içeren ve doğrudan gerçek dünya problemlerinde karşımıza çıkan karmaşık-değerli sinyal tiplerinin işlenebilmesi için reel düzlem yerine algoritmaların karmaşık düzlemde tasarlanmasına ihtiyaç vardır [2, 4-8]. Karmaşık-değerli sinyaller, sadece yön ve şiddet formunda değil aynı zamanda reel ve imajiner bileşenler formunda da ifade edilebilen sinyallerdir [2, 4-8]. Literatürde, karmaşık-değerli sinyallerin işlenebilmesi için karmaşık-değerli en küçük kare (complex-valued least mean square (CLMS)) tabanlı algoritmalar tasarlanmıştır [1-5, 8]. Bu algoritmaların tasarım süreci incelendiğinde, reel düzlemde ki tasarımlara benzer şekilde öncelikle minimize edilecek maliyet fonksiyonları karmaşık düzlemde ifade edilmektedir. Bu ifade edilen maliyet fonksiyonlarının, reel düzlemdeki maliyet fonksiyonlarından temel farkı karmaşık değişkenlerin reel değerli bir fonksiyonu olmasıdır. Karmaşık düzlemde tasarlanan CLMS tabanlı algoritmalar basit yapılarından dolayı oldukça popüler algoritmalar fakat genel problemleri farklı

gürültü tiplerinde yakınsama başarımlarının düşmesidir [7, 9]. Ayrıca küresel minimum noktaya yaklaşmayı her zaman garanti edemeyen adaptif filtre algoritma türleridir [7].

Son zamanlarda, adaptif filtrelerde başarımları artırmak için, yüksek dereceden istatistik tabanlı adaptif filtre algoritmaları önerilmiştir [9-20]. Bu algoritmaların içerisinde en küçük ortalama kurtosis (LMK) algoritması [9], hesaplama verimliliği ve farklı dağılımdaki gürültü sinyallerine karşı gürbüzlüğü nedeniyle adaptif filtreleme problemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [7, 9-16]. LMK algoritması [9], hata sinyalinin negatif kurtosis ile tanımlanmış maliyet fonksiyonunu en aza indirilmesine dayanmaktadır. Tanımlanan bu maliyet fonksiyonu, gürültü ile sistem uyumsuzluğunu istatistiksel olarak bir birinden ayırır ve bu sayede LMK algoritmasının farklı gürültü dağılımlarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlar [9-16]. Ayrıca, LMK algoritmasının adım büyüklüğü yeterince küçük seçilirse, kurtosis maliyet fonksiyonu ile tanımlanan hata başarımları küresel minimum noktaya sahip olur [9, 12-16]. LMK algoritmasının bu özellikleri son zamanlarda adaptif sinyal işleme alanında büyük bir ilgi uyandırmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar [7, 9-16], LMK algoritmasının özellikle en küçük ortalama kare (LMS) tipi algoritmalarından daha iyi bir başarımları sergilediğini göstermiştir. Fakat [9]'da önerilen LMK algoritması ilk olarak reel düzlemde tasarlandığından karmaşık-değerli sinyalleri işlemek için uygun değildir. Bu kapsamda ilk olarak Mengüç ve Acır [7]'de yer alan çalışmalarında, [9]'da önerilen LMK algoritmasının genişletilmiş versiyonu olan karmaşık-değerli LMK (CLMK) algoritmasını önermişlerdir. Yapılan çalışmada öncelikle maliyet fonksiyonu olarak hata sinyalinin kurtosis fonksiyonu karmaşık düzlemde tanımlanmış ve ardından CR analiz tekniği yardımıyla minimize edilmiştir. Yapılan bu çalışma [7], önerilen CLMK algoritmasının, karmaşık-değerli sistem kimlikleme problemleri için klasik CLMS algoritmasından daha iyi yakınsama ve kararlı durum başarımları gösterdiğini ortaya koymuştur. Önerilen algoritma [7] her ne kadar iyi bir başarımları sergilese de doğrusal bir yapıya sahip olduğu için doğrusal olmayan karmaşık-değerli sinyallerin işlenebilmesi için uygun değildir.

Karmaşık-değerli sinyal işleme alanında, gerçek dünya sinyalleri hem doğrusal olmayan bir davranışa hem de geniş bir dinamiğe sahiptirler. Bu yüzden bu tip sinyallerin doğrusal sinyal işleme teknikleriyle işlenebilmesi oldukça zordur. Bu kapsamda literatürde [2, 21], CNGD tabanlı tam karmaşık doğrusal olmayan FIR filtre algoritması tasarlanmıştır. Fakat bu algoritma, CLMS algoritmasıyla benzer dezavantajlara sahiptir ve başarımlarının iyileştirilmesine ihtiyaç vardır.

Bu kapsamda, ilk defa bu çalışmada karmaşık-değerli doğrusal olmayan en küçük ortalama kurtosis (CNLMK) tabanlı yeni bir tam karmaşık doğrusal olmayan FIR filtre algoritması önerilmektedir. Bu çalışmada önerilen CNLMK algoritmasının, [7] ve [15]'de yer alan çalışmalardan temel farkı karmaşık-değerli doğrusal olmayan sinyallerin işlenebilmesi için doğrusal olmayan bir FIR filtre yapısına sahip olmasıdır. Önerilen algoritmanın başarımları, karmaşık-değerli sinyallerin tahmini üzerinde test edilmiş ve CNGD algoritması [2, 21] ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışma, önerilen algoritmanın karmaşık-değerli sinyallerin tahmininde hem MSE hem de tahmin kazancı açısından başarımları dikkate değer bir şekilde artırdığını açık bir şekilde göstermektedir.

2. TAM KARMAŞIK DOĞRUSAL OLMAYAN ADAPTİF FIR FİLTRELERİN EĞİTİMİ İÇİN CNLMK ALGORİTMASININ TASARIMI (DESIGN OF CNLMK ALGORITHM FOR TRAINING FULLY COMPLEX ADAPTIVE FIR FILTERS)

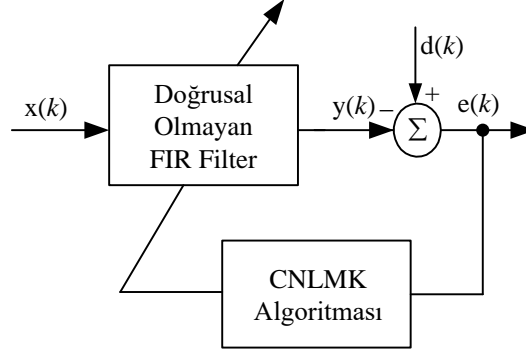
Bu bölümde, CNLMK algoritmasının tasarım süreci sunulmaktadır. Şekil 1'de tam karmaşık doğrusal olmayan adaptif FIR filtrenin blok diyagramı yer almaktadır. Burada filtrenin çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$y(k) = \Phi(\mathbf{w}^H(k)\mathbf{x}(k)) \quad (2.1)$$

burada Φ , H , $\mathbf{w}(k)=[w(k), w(k-1), \dots, w(k-M)]^T$ ve $\mathbf{x}(k)=[x(k), x(k-1), \dots, x(k-M)]^T$ sırasıyla karmaşık-değerli doğrusal olmayan fonksiyonu, eşlenik transpozu, filtre ağırlık vektörünü ve filtre giriş vektörünü tanımlamaktadır. Ayrıca M ifadesi doğrusal olmayan filtrenin derecesini, T ise transpozu temsil etmektedir. Karmaşık-değerli hata sinyali ise Denklem (2.2)'de tanımlanmaktadır.

$$e(k) = d(k) - y(k) = d(k) - \Phi(\mathbf{w}^H(k)\mathbf{x}(k)) \quad (2.2)$$

burada $d(k)$ beklenen sinyali temsil etmektedir.



Şekil 1. Tam karmaşık doğrusal olmayan adaptif FIR filtrenin blok diyagramı

Yapılan bu tanımlamaların ardından, hata fonksiyonun kurtosisi ile tanımlanan maliyet fonksiyonu [7] karmaşık düzlemde aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$J(k) = 3E^2 \{e(k)e^*(k)\} - E \{e(k)e^*(k)e(k)e^*(k)\} \quad (2.3)$$

burada E beklenen değeri temsil eder. Buradaki amacımız, tanımlanan bu maliyet fonksiyonunu karmaşık-değerli filtre ağırlık vektörü $\mathbf{w}(k)$ 'ya göre minimize ederek en iyi ağırlık vektörü olan $\mathbf{w}_o(k)$ 'yı elde etmektir. Fakat maliyet fonksiyonu $J(k)$, karmaşık değişkenlerin reel-değerli bir fonksiyonu olduğundan Cauchy-Riemann koşullarını sağlamaz ve bu yüzden doğrudan karmaşık düzlemde kısmi türevi alınmaz. Bu problemin üstesinden gelebilmek için literatürde yaygın kullanılan CR analiz tekniğinin (aynı zamanda Wirtinger analiz olarak da bilinen) kullanılması gerekir [2, 9]. CR analiz sayesinde bu tip fonksiyonların hem $\mathbf{w}(k)$ hem de $\mathbf{w}^*(k)$ 'ya göre kısmi türevleri alınabilir [2]. CR analiz tekniği için detaylı bilgiye [2, 7]'den ulaşılabilir. CR analiz kullanılarak, Denklem (2.3)'de tanımlanan maliyet fonksiyonu $J(k)$ 'nın $\mathbf{w}^*(k)$ 'ya göre türevi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\nabla J_{CLMK} = \frac{\partial J_{CLMK}}{\partial \mathbf{w}^*(k)} = 6E \{e(k)e^*(k)\} \frac{\partial E \{e(k)e^*(k)\}}{\partial \mathbf{w}^*(k)} - \frac{\partial E \{e(k)e^*(k)e(k)e^*(k)\}}{\partial \mathbf{w}^*(k)} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'de yer alan kısmi türevlerin beklenen değerleri [4, 5]'deki çalışmalara benzer şekilde, stokastik yaklaşım kullanılarak anlık değerleriyle yer değiştirilir. Böylece maliyet fonksiyonu $J(k)$ 'nın stokastik yaklaşımı $\hat{\nabla} J_{CLMK}$ aşağıdaki gibi yeniden ifade edilir:

$$\hat{\nabla} J_{CLMK} = 6E \{e(k)e^*(k)\} \frac{\partial (e(k)e^*(k))}{\partial \mathbf{w}^*(k)} - \frac{\partial (e(k)e^*(k)e(k)e^*(k))}{\partial \mathbf{w}^*(k)} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'de ki ifade çözüldüğünde ise:

$$\hat{\nabla} J_{CLMK} = -4 \left(3E \{ e(k)e^*(k) \} - e^*(k)e(k) \right) e^*(k) \Phi'(k) \mathbf{x}(k) \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\Phi'(k) = \Phi'(\mathbf{w}^H(k)\mathbf{x}(k))$ tam karmaşık doğrusal olmayan fonksiyonun türevini ifade ederken, $E\{e(k)e^*(k)\}$ niceliği hata sinyalinin varyansı $\sigma_e^2(k)$ 'yi temsil eder. Gerçek zamanlı uygulamalarda ise $E\{e(k)e^*(k)\} = \sigma_e^2(k)$ niceliğinin Denklem (2.7)'deki ifade kullanılarak anlık olarak kestirilmesi gerekmektedir [7, 9].

$$\sigma_e^2(k) = \beta \sigma_e^2(k-1) + e(k)e^*(k), \quad 0 < \beta < 1 \quad (2.7)$$

burada β unutm faktörünü temsil etmektedir ve bu parametrenin 0 ile 1 arasında bir değere kurulması gerekmektedir.

Sonuç olarak, önerilen CNLMK algoritmasının ağırlık vektörü güncelleme kuralı aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(k+1) &= \mathbf{w}(k) + \mu \left(-\hat{\nabla} J_{CLMK} \right) \\ &= \mathbf{w}(k) + \mu \left(3\sigma_e^2(k) - e^*(k)e(k) \right) e^*(k) \Phi'(k) \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (2.8)$$

burada adım büyüklüğü μ küçük bir değer seçilmesi durumunda, önerilen algoritma en iyi çözüme yakınsamayı garanti eder [7, 9]. Ayrıca belirtmek gerekir ki Denklem (2.6)'da yer alan 4 sabiti μ 'nün içerisinde yerleştirilmiştir. Hem adım büyüklüğü μ hem de unutm faktörü β algoritmanın yakınsama hızı ile ortalama kare hata arasındaki dengeyi kontrol eder. Unutm faktörünün her ne kadar 0 ile 1 arasında seçilmesi gerekse de, pratikte bu değer 1'e yakın bir değere kurulması gerekir. Önerilen CNLMK algoritmasının sözde kodu adım adım Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo1. CNLMK Algoritmasının Sözde Kodu

<p><u>Parametreler:</u></p> <p>$\mu \ll 1, \mu \in \mathfrak{R}^+$ ve $0 < \beta < 1$.</p> <p>$\mathbf{w}(0) = \mathbf{0}$ ve M doğrusal olmayan FIR filtrenin derecesi</p> <p><u>Veri:</u> $\{x_k, d_k\}_{k=1}^K$</p> <p><u>Algoritma Döngüsü:</u></p> <p>$y(k) = \Phi(\mathbf{w}^H(k)\mathbf{x}(k))$</p> <p>$e(k) = d(k) - y(k)$</p> <p>$\sigma_e^2(k) = \beta \sigma_e^2(k-1) + e(k)e^*(k)$</p> <p>$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu \left(3\sigma_e^2(k) - e^*(k)e(k) \right) e^*(k) \Phi'(k) \mathbf{x}(k)$</p>
--

3. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, önerilen CNLMK algoritmasının başarımı tahmin problemi üzerinde test edilmiştir. Bütün benzetimlerde doğrusal olmayan FIR filtrenin derecesi 4 olarak seçilmiştir. Ayrıca, FIR filtrenin doğrusal olmayan fonksiyonu Φ , karmaşık-değerli hiperbolik tanjant fonksiyonu olarak seçilmiştir. Önerilen CNLMK algoritmasının başarımı CNGD algoritması [2, 6] ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda, önerilen algoritmanın adım büyüklüğü ve unutma faktörü sırasıyla $\mu = 5 \times 10^{-3}$ ve $\beta = 0.995$ olarak seçilmiştir. Öte yandan iyi bir başarımla elde etmek için CNGD algoritmasının adım büyüklüğü $\mu = 0.01$ olarak seçilmiştir. Başarım ölçütü olarak ise Denklem (3.1)'de verilen standart tahmin kazancı R_p [2] ve MSE ifadeleri kullanılmıştır. Çalışmada sunulan benzetim sonuçları, bağımsız 500 deneyin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

$$R_p = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_d^2}{\sigma_e^2} \right) [dB] \quad (3.1)$$

burada σ_d^2 ve σ_e^2 sırasıyla giriş ve anlık hata sinyallerinin varyansını temsil etmektedir.

Yapılan çalışmada, literatürde yaygın bir şekilde kullanılan karmaşık-değerli sentetik sinyaller ve gerçek dünya sinyali olan karmaşık-değerli radar sinyali kullanılmıştır. Bu sinyallere ait genel bilgilere ve matematiksel ifadeler aşağıda yer verilmiştir.

Çalışmada kullanılan ilk sinyal Denklem (3.2)'de verilen karmaşık-değerli otoregresif (autoregressive (AR)) süreçtir [2].

$$d(k) = 1.79d(k-1) - 1.85d(k-2) + 1.27d(k-3) - 0.41d(k-4) + n(k) . \quad (3.2)$$

Kullanılan ikinci sinyal, Denklem (3.3)'de verilen karmaşık-değerli otoregresif yürüyen ortalama (autoregressive moving average (ARMA)) sürecidir [2].

$$d(k) = 0.7d(k-1) + 2n(k) + 0.5n^*(k) + n(k-1) + 0.9n^*(k-1) \quad (3.3)$$

Denklem (3.2) ve (3.3)'de, $n(k)$ ifadesi karmaşık-değerli sıfır ortalamalı birim varyansa sahip beyaz gürültüdür. Ayrıca bu sinyalin reel ve imajiner bileşenleri bir birinden bağımsızdır.

Üçüncü sinyal olarak ise Denklem (3.4)'de verilen karmaşık-değerli doğrusal olmayan Ikeda sinyali [2] benzetimlerde kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} t(k) &= 0.4 - \left(6 / \left(1 + x^2(k) + y^2(k) \right) \right) \\ x(k+1) &= 1 + u(x(k) \cos[t(k)] - y(k) \sin[t(k)]) \\ y(k+1) &= u(x(k) \sin[t(k)] + y(k) \cos[t(k)]) \end{aligned} \quad (3.4)$$

burada $u = 0.8$.

Son olarak ise yapılan çalışmada, karmaşık-değerli gerçek dünya sinyali olan radar sinyali [22] kullanılmıştır. Radar sinyali [22]'de verilen web sitesinden elde edilmiştir.

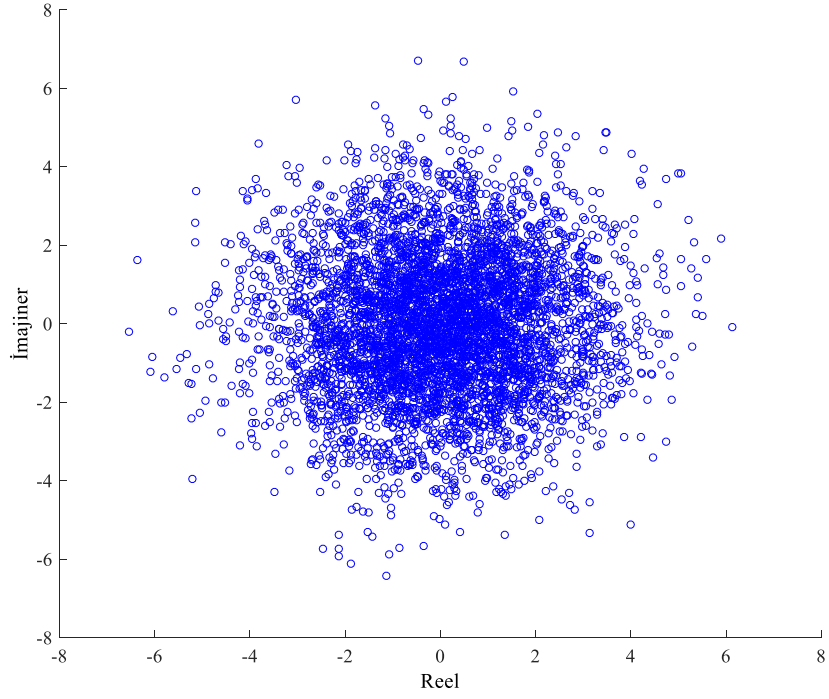
Şekil 2, 3, 4 ve 5’de sırasıyla benzetimde kullanılan karmaşık-değerli AR, ARMA, Ikeda ve Radar sinyallerinin reel ve imajiner eksen üzerindeki çizimleri yer almaktadır. Şekil 2, 3, 4 ve 5’den görüldüğü üzere bütün sinyaller reel ve imajiner eksen üzerinde farklı şekilde dağılımlara sahiptirler. Tablo 2’de ise benzetimde kullanılan 4 farklı sinyal içinde CNLMK ve CNGD algoritmalarının standart tahmin kazançları desibel (dB) cinsinden sunulmuştur. Tablo 2’den gözlemlenebildiği üzere, önerilen CNLMK algoritması, karmaşık-değerli AR, ARMA, Ikeda ve Radar sinyallerinin tahmininde CNGD algoritmasına kıyasla daha yüksek bir R_p (dB) kazancı sağlamıştır. Önerilen algoritmanın bu yüksek başarımının temel sebebi ise Denklem (2.3)’de tanımlanan maliyet fonksiyonun yüksek dereceden istatistiksel bilgileri içermesidir. Bilindiği üzere, CNGD algoritmasının maliyet fonksiyonu sadece ikinci dereceden istatistiksel bilgileri içerir ve buda başarımı önemli ölçüde kısıtlar.

Önerilen CNLMK algoritmanın başarımı sadece tahmin kazancı cinsinden değil aynı zaman da MSE (dB) başarımı cinsinden de ölçülmüştür. MSE (dB) başarımın ölçülmesinin temel sebebi, önerilen algoritmanın hem yakınsama hızının hem de kararlı durum hatasının açık bir şekilde gözlemlenebilmesi içindir. Şekil 6, 7 ve 8’de sırasıyla benzetimlerde kullanılan karmaşık-değerli AR, ARMA ve Ikeda sinyalleri için algoritmaların MSE (dB) başarımları sunulmaktadır. Şekil 6, 7 ve 8’de, önerilen CNLMK algoritması hem yakınsama hızı hem de kararlı durum MSE (dB) hatası anlamında CNGD algoritmasından daha üstün bir başarımla sergilediği açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Ayrıca belirtmemiz gerekir ki, karmaşık-değerli radar sinyali tek tur bir ölçüm olduğundan dolayı algoritmaların MSE (dB) başarımları benzetimlerde sunulmamıştır.

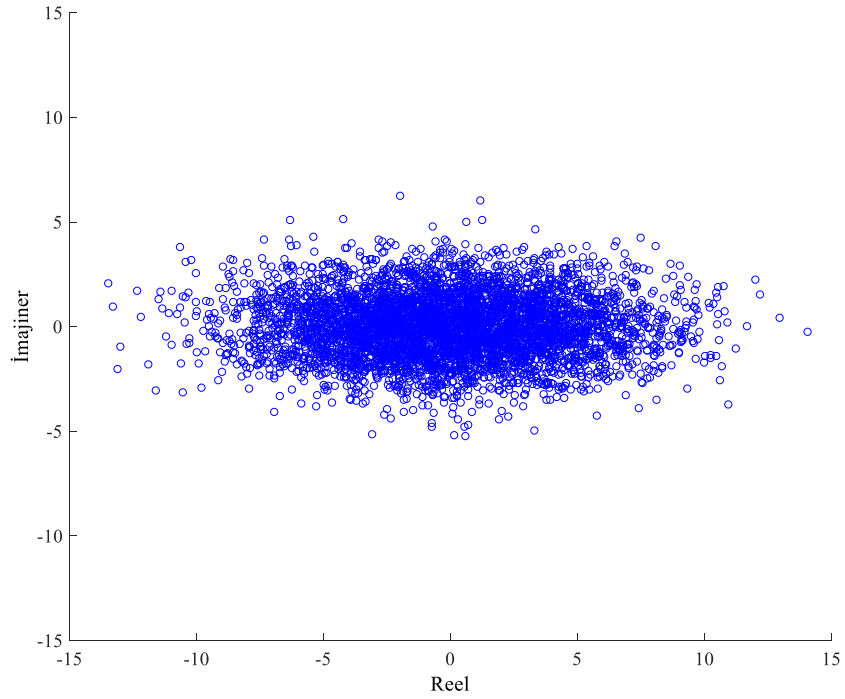
Sonuç olarak, yüksek dereceden istatistiksel bilgileri yapısında bulunduran CNLMK algoritması çeşitli karmaşık-değerli sinyallerin tahmininde, ikinci dereceden istatistiksel bilgilerle çalışan CNGD algoritmasına göre başarımı ciddi bir şekilde artırmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar; önerilen algoritmanın, doğrusal olmayan adaptif sinyal işleme alanına önemli katkılar sağlayacağını açık bir şekilde göstermiştir.

Tablo 2. Karmaşık-değerli AR, ARMA, Ikeda ve Radar sinyalleri için CNLMK ve CNGD algoritmalarının tahmin kazancı başarımları

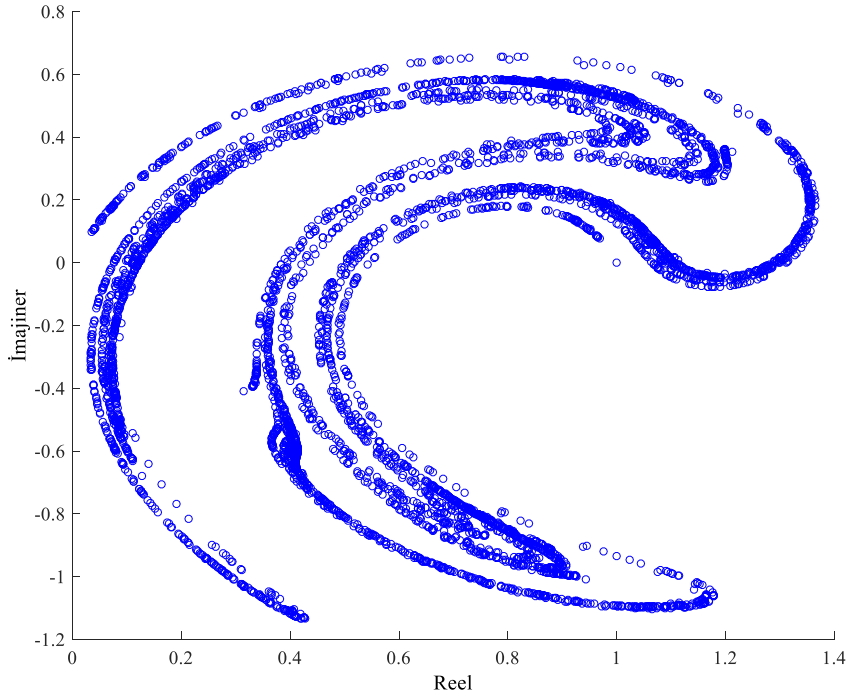
Karmaşık-Değerli Sinyaller	Algoritmaların R_p (dB) Tahmin Kazançları	
	CNGD	CNLMK
AR	3.2208	5.5001
ARMA	3.3999	4.8491
Ikeda	1.9821	2.6040
Radar	14.5142	15.9760



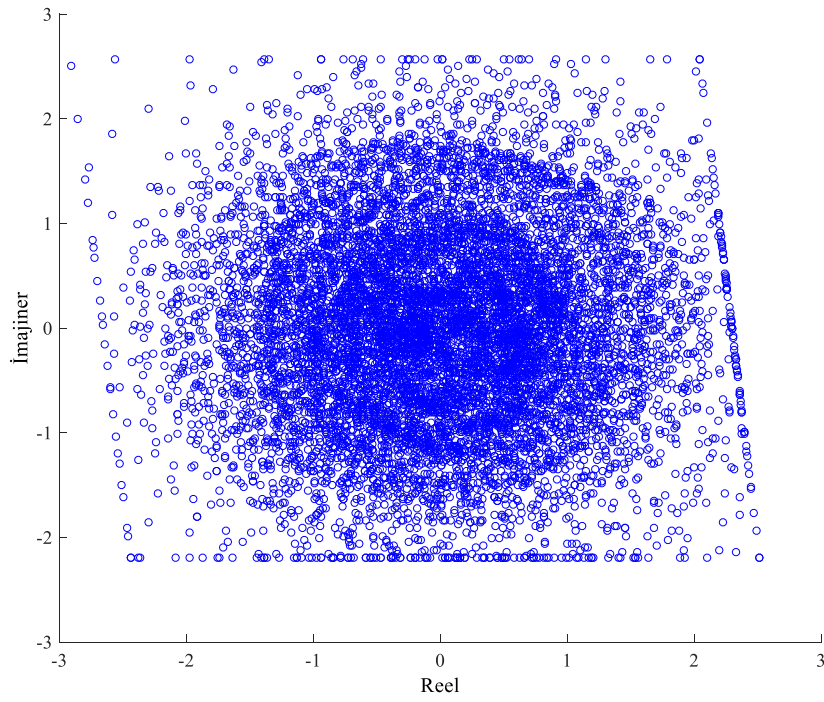
Şekil 2. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli AR sinyalinin reel ve imajiner eksen üzerindeki gösterimi



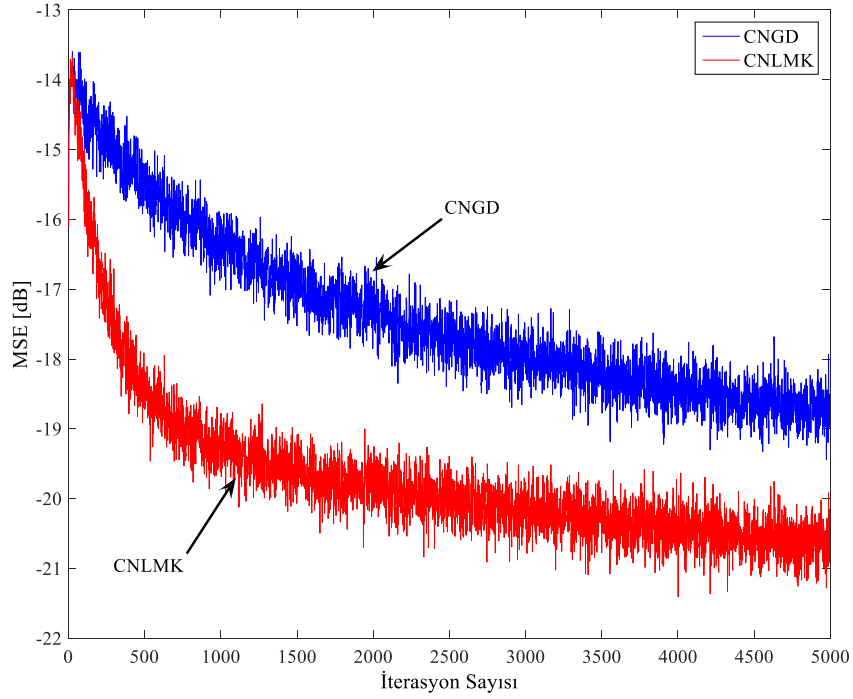
Şekil 3. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli ARMA sinyalinin reel ve imajiner eksen üzerindeki gösterimi



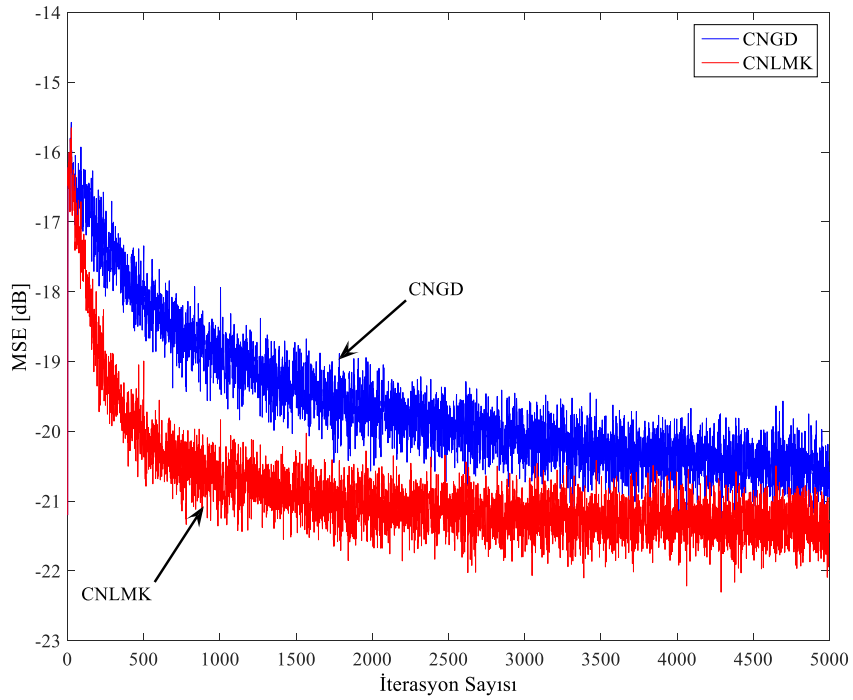
Şekil 4. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli Ikeda sinyalinin reel ve imajiner eksen üzerindeki gösterimi



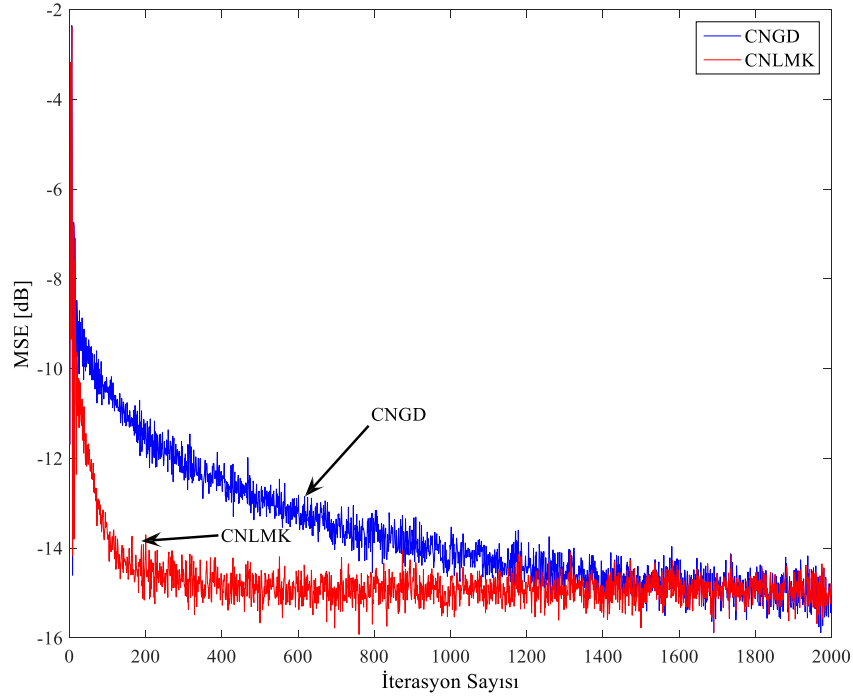
Şekil 5. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli Radar sinyalinin reel ve imajiner eksen üzerindeki gösterimi



Şekil 6. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli AR sinyali için CNLMK ve CNGD algoritmalarının MSE (dB) başarımları



Şekil 7. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli ARMA sinyali için CNLMK ve CNGD algoritmalarının MSE (dB) başarımları



Şekil 8. Benzetimde kullanılan karmaşık-değerli Ikeda sinyali için CNLMK ve CNGD algoritmalarının MSE (dB) başarımları

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, karmaşık-değerli sinyallerin adaptif tahmini için yeni bir tam karmaşık doğrusal olmayan CNLMK algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritmanın tasarımında, öncelikle hata sinyalinin kurtosisi, maliyet fonksiyonu olarak karmaşık düzlemde ifade edilmiş ve doğrusal olmayan filtre yapısı dikkate alınarak minimize edilmiştir. Bu sayede karmaşık düzlemde çalışma kabiliyetine sahip doğrusal olmayan FIR adaptif filtre algoritması karmaşık-değerli sinyallerin işlenebilmesi için tasarlanmıştır. Tasarlanan algoritmanın başarımı, CNGD algoritması ile dört farklı karmaşık-değerli sinyal tahmini üzerinde karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, CNLMK algoritmasının MSE (dB) ve tahmin kazancı (dB) açısından CNGD algoritmasını geride bıraktığını göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Haykin, Adaptive Filtering Theory, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [2] D. P. Mandic, S. L. Goh, Complex Valued Nonlinear Adaptive Filters: Noncircularity, Widely Linear and Neural Models, Wiley, 2009.
- [3] B. Widrow, J. M. McCool, M. Ball, The complex LMS algorithm, Proceedings of the IEEE, 63 (1975) 719-720.
- [4] Y. Xia, C. C. Took, D. P. Mandic, An augmented affine projection algorithm for the filtering of noncircular complex signals, Signal Processing, 90 (2010) 1788–1799.
- [5] B. Jelfs, D. P. Mandic, S. C. Douglas, An adaptive approach for the identification of improper complex signal, Signal Processing, 92 (2012) 335–344.

- [6] E. C. Mengüç, N. Acır, An augmented complex-valued Lyapunov stability theory based adaptive filter algorithm, *Signal Processing*, 137 (2017) 10–21.
- [7] E. C. Mengüç, N. Acır, Complex-valued least mean Kurtosis adaptive filter algorithm, *IEEE 24. Signal Processing and Communication Applications Conference*, (2016) 325-328.
- [8] D. P. Mandic, S. Javidi, S. L., Goh, A. Kuh, K. Aihara, Complex valued prediction of wind profile using augmented complex statistics, *Renewable Energy*, 34 (2009) 196-201.
- [9] O. Tanrikulu, A. G. Constantinides, Least-mean kurtosis: A novel high order statistics based adaptive filtering algorithm, *Electronics Letters*, 30 (1994) 189-190.
- [10] P. I. Hubscher, J. C. M. Bermudez, A model for the behavior of the least mean kurtosis (LMK) adaptive algorithm with Gaussian inputs, *Proceeding of the 2002 International Telecommunications Symposium*, (2002) 1-4.
- [11] N. J. Bershad, J. C. M. Bermudez, Stochastic analysis of the least mean kurtosis algorithm for gaussian inputs, *Digital Signal Processing*, 54 (2016) 35–45.
- [12] L. Lu, H. Zhao, Improved filtered-x least mean kurtosis algorithm for active noise control, *Circuits, Systems and Signal Processing*, 36 (2017) 1586– 1603.
- [13] J. K. Hwang, Y. P. Li, A gradient-based variable step-Size scheme for kurtosis of estimated error, *IEEE Signal Processing Letters*, 17 (2010), 31–334.
- [14] Z. Tang, Z. Yan, Y. Yao, Blind multiuser detector based on LMK criterion, *Electronics Letters*, 35 (1999) 267–268.
- [15] E. C. Mengüç, N. Acır, An augmented complex-valued least-mean kurtosis algorithm for the filtering of noncircular signals, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66 (2018) 438-448.
- [16] E. C. Mengüç, Novel quaternion-valued least-mean kurtosis adaptive filtering algorithm based on the GHR calculus, *IET Signal Processing*, 12 (2018), 487-495.
- [17] J. Chambers, O. Tanrikulu, A. G. Constantinides, Least mean mixed-norm adaptive filtering, *Electronics Letters*, 30 (1994) 1574–1575.
- [18] S. C. Pei, C. C. Tseng, Least mean p-power error criterion for adaptive FIR filter, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12 (1994) 1540–1547.
- [19] Y. Zou, S. C. Chan, T. S. Ng, Least mean M-estimate algorithms for robust adaptive filtering in impulse noise, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 47 (2000) 1564–1569.
- [20] P. I. Hubscher, J. C. M. Bermudez, V. E. Nascimento, A mean square stability analysis of the least mean fourth adaptive algorithm, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55 (2007) 4018–4028.
- [21] A. I Hanna, D. P. Mandic, Adaptive normalized nonlinear gradient descent algorithm for complex-valued nonlinear adaptive filters, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50 (2003) 2540-2549.
- [22] The McMaster IPIX radar sea clutter database (2018): <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix>.



%10 Balık Yağı Biyodizeli-%90 Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Yanma ve Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi

Fatih AKSOY¹, Emre YILMAZ^{2*}

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 03200, Merkez/AFYONKARAHİSAR

²Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 31000, Merkez/HAKKARİ

Öz

Bu çalışmada dizel ve %10 balık yağı biyodizeli-%90 dizel yakıt karışımı ile (B10) çalışan direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda yanma ve motor performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla deney motoru maksimum tork devri olan 2200 d/d'da 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde çalıştırılmıştır. Silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma süresi, tutuşma gecikmesi, indike termik verim ve özgül yakıt tüketimi gibi yanma ve motor performans parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Balık yağı biyodizeli ile silindir basıncı ve ısı dağılımının arttığı yanma süresinin kısaldığı görülmüştür. Deney sonuçlarında balık yağı biyodizeli katkılı yakıt kullanımı ile silindir içi sıcaklığın arttığı görülmüştür. Balık yağının düşük ısıl enerjisinden dolayı biyodizel ile indike ortalama efektif basınç ve indike termik verim azalmıştır. 11.25 Nm motor yükünde dizel yakıtı ile %28.27 termik verim elde edilirken B10 yakıtı ile %25.58 olarak belirlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise aynı motor yükünde dizel yakıtı ile 0.162 kg/kWh hesaplanırken B10 yakıtı ile yaklaşık %32 artarak 0.214 kg/kWh olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının dizel motorda değişikliğe gidilmeden kullanılabilmesini ve yanma karakteristiklerinin iyileştirdiğini göstermiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 02/10/2018

Düzeltilme: 04/11/2018

Kabul: 16/11/2018

Anahtar Kelimeler

Balık yağı biyodizeli

Dizel motoru

Yanma

Motor performansı

Keywords

Fish oil biodiesel

Diesel engine

Combustion

Engine performance

An Investigation of Combustion and Performance Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine Fuelled With The Blends of 10% Fish Oil Biodiesel and 90% Diesel Fuel

Abstract

In the current study, combustion and performance characteristics of a direct injection diesel engine fuelled with the blends of 10% fish oil biodiesel and 90% diesel fuel were investigated experimentally. For this reason, the test engine was run at 2200 rpm and 3.75, 7.5, 11.25 and 15 Nm engine loads. The variations of in-cylinder pressure, heat release, combustion duration, ignition delay, thermal efficiency and specific fuel consumption were observed. In-cylinder pressure and heat release increased while combustion duration was shortened with fish oil biodiesel. Test results showed that in-cylinder temperature increased with fish oil biodiesel. Indicated mean effective pressure (imep) and indicated thermal efficiency (ITE) decreased owing to lower calorific value of fish oil biodiesel. ITE was determined as 28.27% with diesel whereas 25.58% with B10 at 11.25 Nm engine load. Specific fuel consumption (SFC) was computed as 0.162 kg/kWh with diesel while 0.214 kg/kWh with B10 with the increase of about 32%. Test results showed that the blends of fish oil biodiesel-diesel can be utilized without modifications in diesel engines and combustion characteristics were improved.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada ulaşım için enerji tüketimi gittikçe artmaktadır. Sürekli yenilenen egzoz emisyon standartları, fosil kökenli yakıtların azalması, biyodizel gibi alternatif yakıtların geleneksel yakıtların yerini almasına yol açmaktadır. Biyodizel yakıt özelliklerinin dizel yakıtına benzer olması, toksik olmayan, düşük sülfürlü bir yakıt olması sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanımını arttırmaktadır [1-3]. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında düşük HC, CO ve is emisyonları ve makul performans değerleri ile biyodizel gelecek vaat etmektedir. Aynı zamanda yapısında oksijen içeriğinin fazla olması içten yanmalı motorlarda yanma ve performans özelliklerini iyileştirmektedir [3-5]. Bunun yanında bitkisel ve hayvansal kaynaklı yağlardan üretilmekte, biyolojik olarak kolayca parçalanabilmektedir. Bahsi geçen biyodizel yakıtlar içinde balık

yağı atık balık parçalarından ve vücut uzuvlarından elde edilebilmektedir [5-10]. Bitkisel esaslı biyodizel yakıtlar ile karşılaştırıldığında hayvansal esaslı biyodizelin setan sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum yanma sonucu daha fazla ısının açığa çıkmasını sağlamaktadır. Bunun birlikte oksidasyon için yanma ısısı daha az stabildir. Bu nedenle hayvansal esaslı biyodizel yakıtların dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılması daha uygundur. Balık yağı yapı itibari ile çok miktarda doymuş ve doymamış yağ asidi içermektedir. Bunlar arasında yüksek setan içerikli yağ asidi bulunmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanımı ile ilgili literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır [4-15]. Gharehghani ve ark. [1] dizel ve atık balık yağı yakıt karışımlarının (B25, B50, B75) yanma, performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarında atık balık yağı biyodizeli katkısı ile daha fazla silindir basıncı ve daha kısa ısı dağılımı süresinin elde edildiğini göstermişlerdir. Bunun yanında biyodizel yakıt karışımları ile daha stabil bir yanmanın olduğunu çevrimsel farklılıkların azaldığını ifade etmişlerdir. Balık yağı biyodizel karışımı ile termik verimin yaklaşık %2.92 oranında ve aynı zamanda CO₂ ve NO_x emisyonlarında sırasıyla %7.2 ve %1.9-12.8 oranlarında arttığını gözlemlemişlerdir. Varuvel ve ark. [7] atık balık yağı biyodizelinin tek silindirli bir dizel motorunda 1500 d/d'da denemişlerdir. %80 motor yükünde fren termik verimini dizel, damıtılmamış ve damıtılmış biyoyakıtlar için sırasıyla %29.98, %32.12 ve %32.4 olarak belirlemişler. Sakthivel ve ark. [8] balık yağından üretilen biyodizelin yoğunluk, viskozite, parlama noktası ve setan sayısı gibi özelliklerini araştırmışlar, dizel-biyodizel yakıt karışımlarının yanma, performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini tek silindirli bir dizel motorunda farklı motor yüklerinde incelemişlerdir. NO_x, CO ve HC emisyonlarında azalma gözlemlemişlerdir. Biyodizel karışımları ile fren termik verimi dizele göre artmıştır. Tutuşma gecikmesi, maksimum ısı dağılımı ve yanma süresinin biyodizel yakıt karışımları ile azaldığını rapor etmişlerdir. Balık yağı biyodizelinin optimizasyonu ile ilgili olarak yapılan çalışmada Hong ve ark. [12] üretim için optimum şartların 120 dakika reaksiyon süresi, 55°C reaksiyon sıcaklığı, 12 metanol/balık yağı molar oranı, %2.0 alkalın katalizör içeriği olduğunu göstermişlerdir. 0.20 mgKOH/g asit değeri, 40°C de 4.60 cSt kinematik viskozite 42.1 MJ/kg ısı değer olarak tespit etmişlerdir. Lin ve Li [16] ham balık yağından elde edilmiş biyodizelin özelliklerini analiz etmişlerdir. Balık yağı biyodizelinin oleik (C18:1) ve palmitik (C16:0) asit içerdiğini göstermişlerdir. Ayrıca önemli miktarda çoklu doymamış yağ asidi içerdiğini belirtmişlerdir. Hossain ve ark. [17] balık yağından üretilen çoklu doymamış biyodizelin oksidasyon stabilitesini iyileştirmek için farklı sentetik antioksidantlar denemişlerdir. Oksidasyon stabilitesi için bütil hidrokinonun en iyi performansı verdiğini görmüşlerdir. Aksoy [18] %50 haşhaşyağı biyodizeli %50 dizel yakıt karışımlarının motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Motor torku ve gücünün sırasıyla %4 ve %5.73 azaldığını görmüştür. Bununla birlikte biyodizel yakıt karışımı ile CO ve NO_x emisyonlarının sırasıyla %15.5 ve %5.9 azaldığını görmüştür. Eryılmaz ve ark. [19] nötrale edilmiş atık kızartma yağını KOH kullanarak optimize etmiştir. Optimum metil ester dönüşüm verimi %25 metanol/yağ oranında, 90 dakika reaksiyon süresi ve 60°C reaksiyon sıcaklığında %90.1 olarak belirlenmiştir. Elde edilen biyodizel tek silindirli bir dizel motorunda denenmiş, motor gücünün ve torkunun dizele göre azaldığını, NO_x emisyonlarının yaklaşık %18.4 arttığını görmüşlerdir. Behçet [20] balık yağı ve balık yağı biyodizelinin tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorunda denemiş ve dizel yakıtı ile karşılaştırmıştır. Balık yağı biyodizelinin dizel yakıtı ile benzer özelliklere sahip olduğunu görmüştür. Motor torku ve gücünün biyodizel yakıtlar ile dizele göre azaldığını görmüştür. Mrad ve ark. [21] balık yağından biyodizel üretmişler ve tek silindirli bir dizel motorunda 1500 d/d'da denemişlerdir. Saf biyodizel ile yapılan deneylerde NO_x emisyonlarının arttığını CO, HC ve is emisyonlarının azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca yakıt karışımlarındaki biyodizel oranı arttıkça silindir basıncının arttığını, yanma süresinin azaldığını görmüşlerdir. Jiaqiang ve ark. [22] balık yağı biyodizeli yakıt karışımları (B0, B10, B20, B30, B40 ve B50) ile çalışan bir dizel motorunda enjeksiyon zamanlamasının ve basıncının performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Karışım yakıtlardaki biyodizel oranı arttıkça motor gücünün azaldığını görmüşlerdir. Özgül yakıt tüketimi ve NO_x emisyonu biyodizel yakıt karışımları ile artmıştır. Enjeksiyon zamanlaması arttırıldıkça fren gücü ilk önce artmış daha sonra azalma eğilimine girmiştir.

Bu çalışmada balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının (B10) yanma ve motor performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmış, dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motoru 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde 2200 d/d'da çalıştırılmış, elde edilen sonuçlar dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada balık yağı biyodizelinin yanma üzerindeki etkilerini görmek amacı ile detaylı bir yanma analizi ve motor performans değerlendirmesinin yapılması amaçlanmıştır. B10

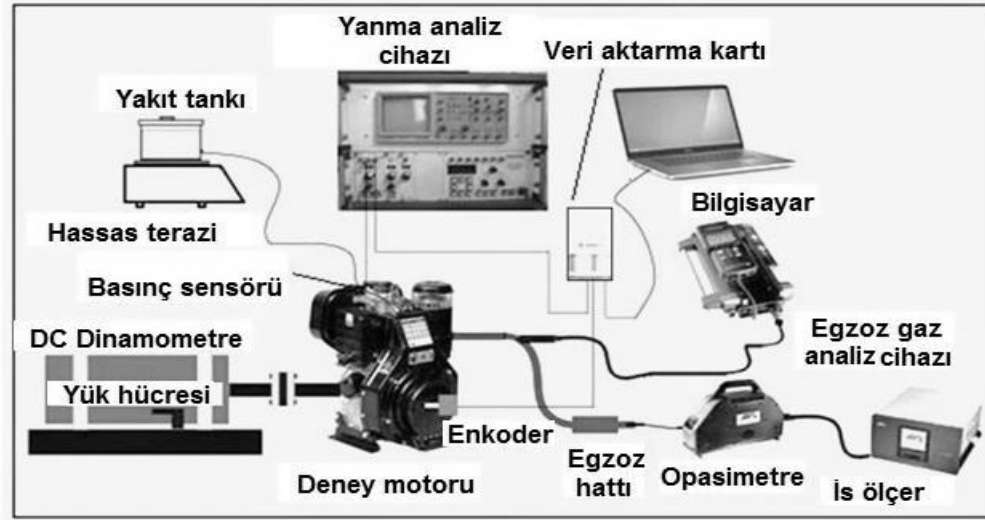
yakıtı ile çalıştırılan dizel motorunda silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma süresi, tutuşma gecikmesi, termik verim ve özgül yakıt tüketimi gibi parametrelerin değişimi deneysel olarak araştırılmıştır.

2. DENEY DÜZENİĞİ VE PROSEDÜRÜ (EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURES)

Testler 2200 d/d'da 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde dizel ve B10 yakıtları ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümsel farklılıkların ortadan kaldırılması için motor deneylere başlanmadan önce çalışma sıcaklığına getirilmiş ve motor yağ sıcaklığı 85 °C'de sabitlenmiştir. Deneylerde teknik özellikleri Tablo 1'de görülen tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motoru kullanılmıştır. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Deney motorunun yüklenebilmesi için Cussons P8160 marka DC dinamometre kullanılmış, deney motoru dört farklı motor yükünde test edilmiştir. Dinamometre şaftından 0.25 m ilerisinde bulunan yük hücresi ile motor yükü tespit edilmiştir. Kullanılan DC dinamometre 4000 d/d'da 10 kW güç absorbe edebilmektedir. Motor torku ve motor devri dinamometre kontrol panelinden kontrol edilebilmektedir. Silindir basıncı su soğutmalı AVL 8QP500c marka piezoelektrik basınç sensörü ile ölçülmüştür. Deney motorunun krank miline bir turda 1000 pals üreten enkoder bağlantısı yapılmıştır. Enkoder ile üst ölü nokta (ÜÖN) ve motor devri ölçülebilmektedir. Silindir basınç verileri 0.36 krank açısı (°KA) aralıklarla tespit edilmiştir. Silindir basınç sinyalleri enkoderden alınan motor devir bilgisine göre alınarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu amaçla alınan analog silindir içi basınç sinyalleri National Instruments USB 6259 veri toplama kartı kullanılarak dijital verilere dönüştürülmüş ve bilgisayara kaydedilmiştir. Silindir basınç verileri matlab dilinde hazırlanan bir programda işlenerek yanma karakteristikleri, imep, termik verim gibi değişkenler belirlenerek grafiklere aktarılmıştır.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri (Technical properties of test engine)

Model	Antor / 6LD400
Motor tipi	Direkt enjeksiyon, doğal emişli
Silindir sayısı	1
ÇapxKurs [mm]	86 x 68
Silindir hacmi [cm ³]	395
Sıkıştırma oranı	18:1
Maksimum güç [kW]	5.4 @ 3000 d/d
Maksimum tork [Nm]	19.6 @ 2200 d/d
Yanma odası geometrisi	ω tipi
Yakıt enjeksiyon sistemi	PF Jerk tipi yakıt pompası
Enjeksiyon nozulu	0.24 [mm] x 4 delik x 160°
Nozul açılma basıncı [bar]	180
Püskürtme zamanlaması[°KA]	24 ÜÖN'dan önce



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the experimental setup)

Deneylerde dizel ve hacimsel olarak %10 balık yağı biyodizeli %90 dizel (B10) karıştırılmış ve kullanılmıştır. Tablo 2’de deney yakıtlarının özellikleri görülmektedir.

Tablo 2. Deney yakıtlarının özellikleri (Properties of test fuels) [22-27]

	Dizel	Balık yağı biyodizeli
Yakıtın alt ısıl değeri [kJ/kg]	45343	37580
Yoğunluk [kg/m ³ @ 15°C]	842	866
Kinematik viskozite [cst @ 40°C]	2.44	4.4
Parlama noktası [°C]	67	142
Setan sayısı	49	56
Sülfür [ppm]	428	26

Deneylerde CO, CO₂, NO egzoz emisyonlarının ölçülebilmesi için Tablo 3’de özellikleri verilen Testo marka egzoz gaz analizörü kullanılmıştır.

Tablo 3. Testo egzoz gaz analiz cihazının özellikleri (Properties of the testo exhaust gas analyzer)

Yanma ürünleri	Çalışma aralığı	Doğruluk
O ₂ [vol.%]	0–25	±2 mV
CO [ppm]	0–10000	5 ppm (0–99 ppm)
CO ₂ [vol.%]	0–50	±0.3 vol.% +1 mV.% (0–25)
HC [%]	0.01–4	<400 ppm (100–4000 ppm)
NO _x [ppm]	0–3000	5 ppm (0–99 ppm)

İs emisyonları ise AVL Di-Smoke 4000 is ölçer ile ölçülmüştür. Tablo 4’de AVL Di-Smoke 4000 is ölçerin teknik özellikleri verilmektedir.

Tablo 4. AVL Di-Smoke 4000 is ölçerin teknik özellikleri (Technical specifications of the VL Di-Smoke 4000 smoke meter)

Analiz cihazı	AVL DiSmoke 4000	
Ölçüm metodu	Kısmi akışlı	
	Opasite	K değeri
Çalışma aralığı	0-100 %	Doğruluk
Doğruluk [m ⁻¹]	0-99,99	0,01

Isı dağılımı hesabında termodinamiğin birinci yasasına bağlı Eş (2.1) kullanılmıştır. Isı dağılımı hesabı yapılırken silindir içi dolgunun ideal gaz olduğu ve gaz kaçaklarının olmadığı kabulleri yapılmıştır. Bu eşitlikte dQ , dQ_{heat} ve $d\theta$ ısı dağılımı, silindir cidarlarına transfer edilen ısıyı ve krank açısını k ise özgül ısıların oranını göstermektedir [28-30].

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta} \quad (2.1)$$

Vuruntu yoğunluğu Eş. (2.2) ile hesaplanmıştır. P_{max} ve T_{max} maksimum basınç ve sıcaklıkları, γ politropik indeksi, $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ maksimum basınç artış oranını, β ise basınç dalgalanmaları ile pik basınç artış oranı arasındaki ilişkiyi veren ayar parametresini göstermektedir.

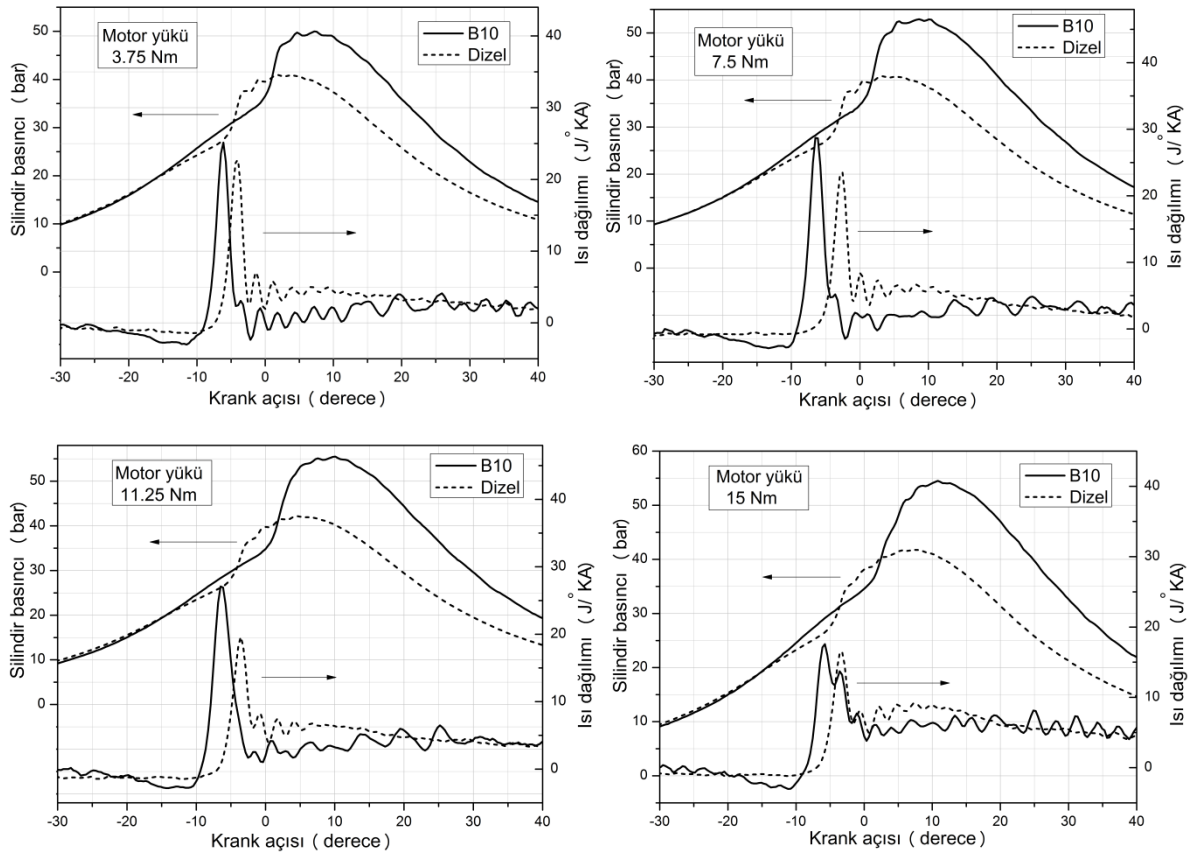
Dizel motorlarda tutuşma gecikmesi devrini sınırlamaktadır. Tutuşma gecikmesi süresi arttıkça vuruntu eğilimi artış göstermektedir. Vuruntulu çalışmada maksimum silindir basıncı ve sıcaklığı ani olarak artar ve motor parçalarının ömrü kısılır [30-32].

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \frac{\left(\beta \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}\right)^2}{P_{max}} \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{max}} \quad (2.2)$$

Isı dağılımı ile yanma başlangıcı ve yanmanın bitişi tespit edilebilir. Yapılan deneylerde yanma başlangıcı krank açısına göre ısı dağılımının negatif değerden pozitif değere geçiş yaptığı krank açısı belirlenerek tayin edilmiştir. Krank açısına göre püskürtme avansı ile yanma başlangıcı arasındaki zaman tutuşma gecikmesini vermektedir. Bu çalışmada yanma süresi olarak silindire alınan karışımın %10’unun yanmasını tamamladığı nokta ile %90’ının yanmasının tamamladığı nokta arasındaki süre hesaplanarak belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

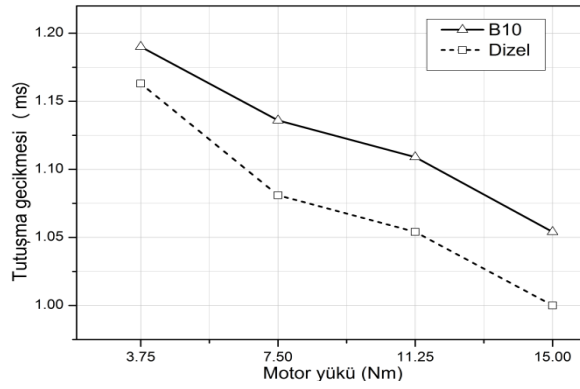
Balık yağı biyodizelinin silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkileri Şekil 2’de görülmektedir. Biyodizelin yüksek yoğunluk ve viskozite değerlerinden dolayı bu çalışmada yüksek oranda balık yağı miktarı yerine düşük miktarda balık yağı biyodizeli dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Yüksek oranda biyodizel ilave edildiğinde karışım yakıtın viskozite, yoğunluk değerleri artmakta, kalorifik enerji miktarı azalmaktadır. Bu durumda yanma karakteristikleri olumsuz etkilenmekte, motor performansı azalabilmektedir. Özellikle fazla biyodizel ilavesi enjeksiyon karakteristiklerini kötüleştirmekte, yakıtın atomizasyonu zorlaşmaktadır. Bu durumda yanma odasında homojen bir karışım sağlanamamakta ve yanma oranı azalmaktadır. Şekil 2 incelendiğinde tüm motor yüklerinde B10 yakıtı ile silindir basıncının ve ısı dağılımının dizele göre arttığı görülmektedir. Biyodizelin yüksek viskozitesinden dolayı kütsel olarak püskürtülen yakıt miktarı artmakta daha fazla ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında motor yükü arttıkça yanmanın rötara alındığı görülmektedir. Motor yükü arttıkça maksimum silindir basıncının daha geç elde edildiği görülmektedir. Balık yağı biyodizelinin ısıl enerjisinin dizele göre düşük olmasına rağmen setan sayısının ve viskozitesinin yüksek olmasından daha fazla silindir basıncının ve ısı dağılımının elde edilmesine neden olmaktadır.



Şekil 2. Silindir basıncı ve ısı dağılımı değişimi (In-cylinder pressure and heat release rate variations)

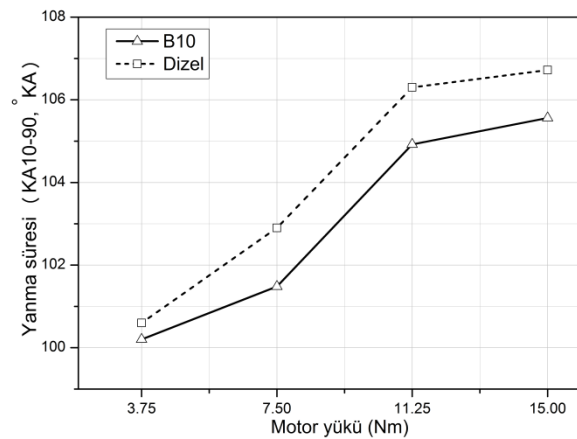
Şekil 3’de dizel ve B10 yakıtları ile belirlenen tutuşma gecikmesi değişimleri görülmektedir. Motor yükü arttıkça silindire sürülen karışım miktarı ve sıkıştırma zamanı sonunda basınç ve sıcaklık daha fazla artmaktadır. Bunun sonucunda yanma sonu elde edilen silindir içi sıcaklık daha fazla yükselmektedir. Yanma odasındaki bu yüksek sıcaklık yakıtın püskürtülmesinin ardından ilk alev çekirdeğinin oluşmasına kadar geçen süreyi azaltmaktadır. Daha sıcak bir yanma odasında oksidasyon reaksiyonları daha kolay gerçekleşebilmekte ve yük arttıkça tutuşma gecikmesi süresi azalmaktadır. Biyodizel yakıtının

yoğunluğunun ve viskozitesinin dizele göre daha fazla olması sonucu yakıtın fiziksel olarak parçalanması, atomizasyonu ve buharlaşarak tutuşmaya başlaması gecikmektedir.



Şekil 3. Tutuşma gecikmesi (Ignition delay)

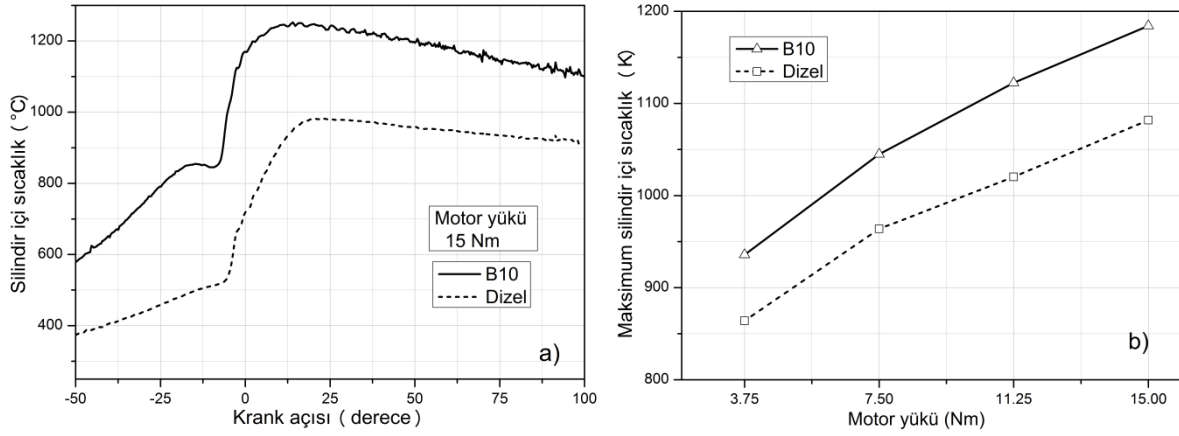
Şekil 4'de yanma süresinin motor yüküne bağlı değişimlerini göstermektedir. Kümülatif ısı dağılımı normalizasyon işlemine tabi tutulduğunda karışımın yanma kademeleri (KA10, KA90) belirlenebilmektedir. Bu çalışmada yanma süresi olarak karışımın %10'nun yanmasını tamamladığı krank açısı ile %90'ının yanmasını tamamladığı krank açısı arasındaki fark (KA10-90) olarak belirlenmiştir. Motor yükü arttıkça yanmayı tamamlamak isteyen karışım miktarı artmaktadır. Bu nedenle daha fazla karışımın yanmasını tamamlaması için daha fazla süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Yük arttıkça yanma süresi uzamaktadır. B10 yakıtı ile yanma süresi azalmaktadır. Biyodizelin setan sayısının yüksek olması sonucu oksidasyon reaksiyonları iyileşmekte yanma daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Ayrıca balık yağı biyodizelinin daha fazla oksijen içermesi kimyasal yanma reaksiyonlarını hızlandırmakta ve buda yanma süresini kısaltmaktadır. 15 Nm motor yükünde dizel ve B10 yakıtları ile yanma sırasıyla 106.72 °KA ve 105.56 °KA sürmüştür.



Şekil 4. Yanma süresi (Combustion duration)

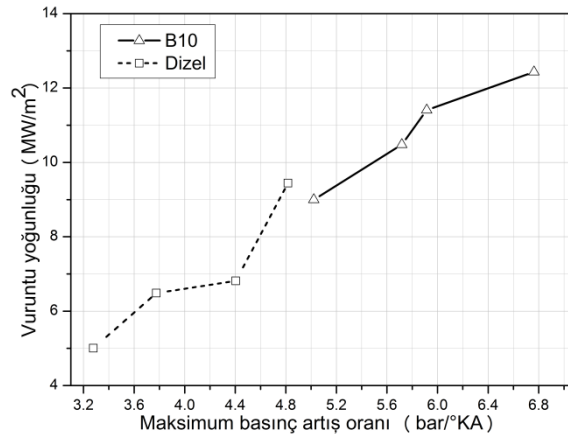
Şekil 5'de B10 ve dizel yakıtları ile elde edilen silindir içi sıcaklık ve maksimum silindir içi sıcaklık değişimleri görülmektedir. 15 Nm motor yükünde krank açısına göre hesaplanan silindir içi sıcaklık değerleri B10 yakıtı ile artış göstermektedir. Benzer şekilde yanma sonu elde edilen maksimum silindir içi sıcaklık B10 yakıtı ile elde edilmiştir. Maksimum silindir içi sıcaklık 15 Nm yükte elde edilmiştir. Balık yağı biyodizelinin yüksek oksijen içeriği ve setan sayısına bağlı olarak sıcaklık artmaktadır. Aynı zamanda silindire birim hacimde püskürtülen yakıt miktarı dizele göre daha yüksek olduğundan açığa çıkan ısı ve

yanma odası sıcaklığı artmaktadır. Maksimum silindir içi sıcaklık dizel ve B10 yakıtları ile 15 Nm yükte sırasıyla 1081.8 K ve 1184.2 K olarak belirlenmiştir.



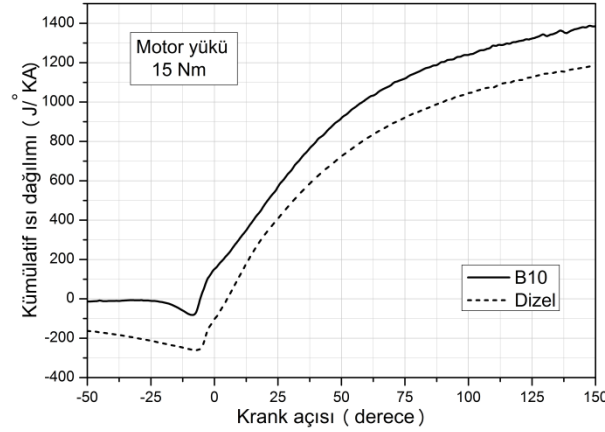
Şekil 5. Silindir içi sıcaklık değişimleri (In-cylinder temperature variations)

Vuruntu, dizel motorlarda artan tutuşma gecikmesine bağlı olarak tüm karışımın yanmaya bir anda iştirak etmesi sonucu meydana gelen ani patlamadır. Bu durum motor parçalarına ve yataklara gelen yükü arttırmakta ve yağ boşluğunu kapatarak motora zarar verebilmektedir. Aynı şekilde basınç artış oranı birim krank açısı başına piston üzerine uygulanan basıncı ifade etmektedir. Vuruntu yoğunluğu motor devrine, maksimum basınç artış oranına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Şekil 6 maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimini göstermektedir. Beklendiği gibi motor yükü arttıkça basınç artış oranı ve vuruntu yoğunluğu artmaktadır. Daha fazla karışımın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisi artış göstermekte, silindir basıncı aniden yükselmektedir. Şekil 6'dan açıkça görülmektedir ki B10 yakıtı ile vuruntu yoğunluğu ve maksimum basınç artış oranı dizele göre daha yüksektir. Balık yağı biyodizelinin yüksek yoğunluğu, oksijen içeriği ve setan sayısına bağlı olarak yanma oranının arttığını ifade etmek mümkündür. Sonuçta dizele göre maksimum basınç artış oranı B10 ile artmaktadır. Bu noktada düşük miktarlardaki balık yağı biyodizel oranının tercih edilmesi vuruntunun kontrol edilmesi ve yanma özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.



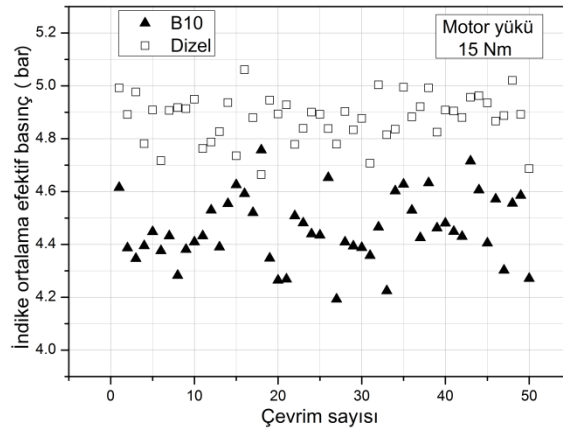
Şekil 6. Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimi (Knock density variation due to maximum pressure increase rate)

Şekil 7’de krank açısına bağlı kümülatif ısı dağılımının değişimi görülmektedir. Kümülatif ısı dağılımı krank açısına bağlı yanma odasında açığa çıkan ısı enerjisinin toplamı olarak ifade edilebilir. Ayrıca kümülatif ısı dağılımı normalize edilerek karışımın yanma aşamaları hakkında analiz yapılabilir. 15 Nm motor yükünde B10 yakıtı ile daha fazla ısının açığa çıktığını söylemek mümkündür. Bu durum biyodizelin yüksek oksijen içeriği, setan sayısı ve makul ısıl enerjisine bağlı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 7. Kümülatif ısı dağılımı (Cumulative heat release rate)

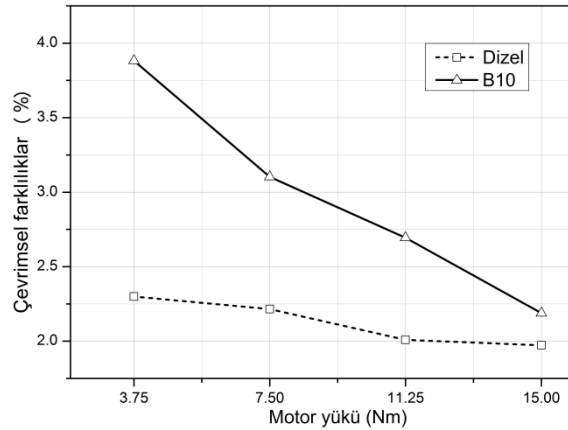
İndike ortalama efektif basınç bir çevrim boyunca piston üzerine etki ettirilen basınçların ortalamasını ifade eden motor performans parametrelerinden biridir. Şekil 8’de 15 Nm motor yükünde ardışık 50 çevrime bağlı indike ortalama efektif basınçları (imep) göstermektedir. 15 Nm motor yükünde silindire alınan enerji miktarı artış göstermektedir. Yanma sonu elde edilen basınç ve sıcaklık artmaktadır. Bu noktada imep değişimleri için 15 Nm motor yükü tercih edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde dizel yakıtı ile elde edilen imep değerlerinin B10 yakıtına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Dizel yakıtının ısıl enerjisinin balık yağı biyodizeline göre yüksek olması imep değerlerinin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 8. İndike ortalama efektif basınç değişimi (Indicated mean effective pressure variation)

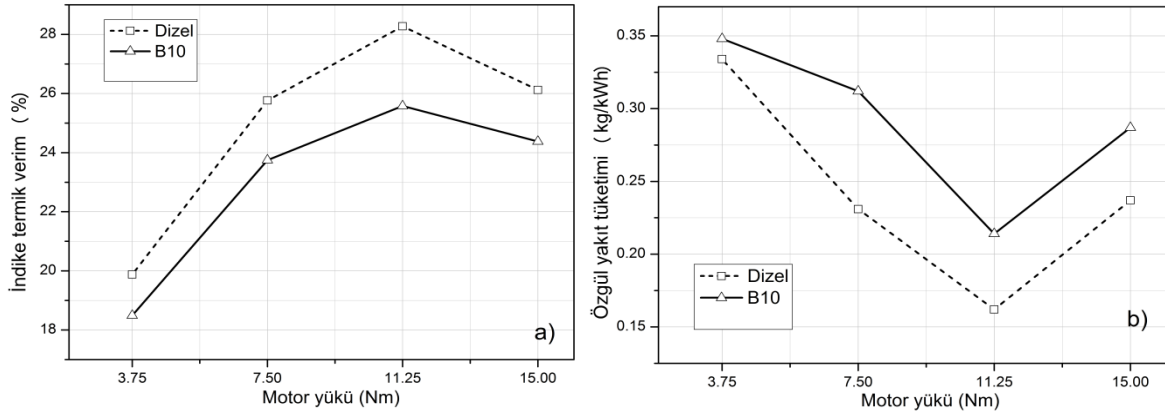
Silindire alınan karışımın kompozisyonu ve yanma odasındaki termodinamik şartlar çevrimden çevrime değişmektedir. Supap sisteminden, segmanlardan veya kapak contasından sızan karışım kütlesi ve egzoz zamanı sonunda yanma odasından dışarı atılmayan art egzoz gazları elde edilen silindir içi basıncı ve sıcaklığı değiştirmektedir. Sonuçta çevrimden çevrime farklılıklar görülmektedir. Bu durum motorun performans sürekliliğini ve yanma stabilitesini kötüleştirilmektedir. Bu nedenle yanma analizinde çevrimsel

farklılıkların tespiti önem arz etmektedir. Literatürde stabil bir yanma işleminde çevrimsel farklılıkların % 10'u geçmemesi istenmektedir [28-30]. Kararlı yanma sürecinde bu durum göz önüne alınmaktadır. Şekil 9 motor yüküne göre indike ortalama efektif basınca bağlı çevrimsel farklılıkların değişimini göstermektedir. Maksimum çevrimsel farklılıklar en düşük motor yükünde görülmüştür. Motor yükü arttıkça silindire alınan karışım miktarı artmakta, buna bağlı elde edilen silindir basıncı ve sıcaklık yükselmektedir bu durum oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesine çevrimden çevrime gözlenen farklılıkların azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte dizel yakıtı ile daha stabil bir yanmanın gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Balık yağı biyodizelinin yüksek viskozitesi ve yoğunluğu enjeksiyon esnasında atomizasyon sürecini kötüleştirir. Bu durum tutuşma gecikmesi süresinin uzamasına dizel yakıtına göre daha kararsız bir yanmanın gerçekleşmesine sebep olabilmektedir. Sonuçta B10 yakıtı ile dizele göre çevrimsel farklılıklar artmaktadır.



Şekil 9. Çevrimsel farklılıklar (Cyclical variations)

Şekil 10'da motor yüküne bağlı indike termik verim ve özgül yakıt tüketiminin değişimi görülmektedir. Termik verim yakıt ile silindire sürülen ısı enerjisinin ne kadarının efektif güce dönüştüğünün bir ifadesidir. Maksimum indike termik verim her iki yakıt için 11.25 Nm motor yükünde elde edilmiştir. 11.25 Nm motor yükünde gaz kaçaqları ve ısı kayıpları en aza inmekte daha fazla ısı, efektif güce dönüştürülebilmektedir. 11.25 Nm motor yükü aynı zamanda yakıt enerjisinin en ekonomik kullanıldığı yüke karşılık gelmektedir. Şekil 10-a'da görüldüğü gibi 11.25 Nm motor yükünde dizel yakıtı ile %28.27 indike termik verim elde edilirken B10 yakıtı ile %9.51 azalma görülmüş ve %25.58 termik verim hesaplanmıştır. 11.25 Nm motor yükünden sonra karışımdaki yakıt konsantrasyonu artmakta ve yakıt, oksidasyon için yanma odasında yeterli oksijeni bulamamaktadır. Bunun sonucunda her iki test yakıtı için termik verim azalmaktadır. Dizel yakıtının ısı enerjisinin yüksek olmasına bağlı olarak termik verim B10 yakıtına göre artmaktadır. Şekil 10-b motor yüküne bağlı özgül yakıt tüketiminin değişimini göstermektedir. Her iki grafik incelendiğinde maksimum termik verimin elde edildiği yükte minimum özgül yakıt tüketimi belirlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi motorun ürettiği birim güç başına birim zamanda tüketilen yakıt miktarını ifade etmektedir. Benzer şekilde 11.25 Nm motor yükünde dizel ve B10 yakıtları ile sırasıyla 0.162 kg/kWh ve 0.214 kg/kWh özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Dolayısıyla dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında aynı motor gücüne ulaşabilmek için daha fazla B10 yakıtı tüketilmelidir. 15 Nm motor yükünde ise yanma odasında oksijen konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak yanma kötüleşmekte özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Bunun yanında biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluk değeri göz önüne alındığında silindire kütülece daha fazla yakıt püskürtülmektedir. Bu durum dizele göre yakıt tüketiminin artmasına neden olabilmektedir.



Şekil 10. a) İndike termik verim (Indicated thermal efficiency) b) Özgül yakıt tüketimi (Specific fuel consumption)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada dizel ve balık yağı biyodizeli yakıt karışımı (B10) tek silindirli, dört zamanlı doğal emişli bir dizel motorunda farklı motor yüklerinde (3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm) ve motorun maksimum tork devri olan 2200 d/d'da test edilmiş, sonuçlar dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Balık yağı biyodizelinin yanma ve performans üzerindeki etkilerini görmek amacı ile detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarında silindir basıncı ve ısı dağılımının B10 yakıtı ile arttığını göstermiştir. Tutuşma gecikmesi süresi ve yanma süresi B10 yakıtı ile yüksek viskozite ve yoğunluk değerlerinden dolayı artmıştır. İndike termik verim dizele göre %9.51 azalarak %25.58 olarak belirlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise dizel ile karşılaştırıldığında B10 yakıtı ile 11.25 Nm motor yükünde yaklaşık %32 artarak 0.214kg/kWh olarak belirlenmiştir. Biyodizelin yüksek oksijen içeriğine bağlı olarak yanma sonunda silindir içi sıcaklığın dizele göre arttığı görülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde balık yağı biyodizelinin ısı enerjisinin dizele yakın olması, setan sayısının dizelden fazla olması makul yanma ve performans değerlerinin elde edilmesini sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda biyodizelin oksijen içeriğinin fazla olması kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesini sağlamaktadır. Yapılan çalışma balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının (B10) yanma üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve dizel motorlarda hiçbir değişiklik yapılmadan verimli bir şekilde yakıt olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Ghareghani, M. Mirsalim, R. Hosseini, Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission, Renewable Energy 101 (2017) 930-936.
- [2] Veltman MK, Karra PK, Kong SC. Effects of Biodiesel Blends on Emissions in Low Temperature Diesel Combustion. SAE 2009-01-0458.
- [3] B.-F. Lin, J.-H. Huang, D.-Y. Huang, Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions, Fuel 88 (2009) 1779-1785.
- [4] T.D. Durbin, J.M. Norbeck, Effects of biodiesel blends and Arco EC-diesel on emissions from light heavy-duty diesel vehicles, Environ. Sci. Technol. 36 (2002) 1686-1691.
- [5] F. Wu, J.Wang, W. Chen, S. Shuai, A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels, Atmos. Environ. 43 (2009) 1481-1485.

- [6] E. Jiaqiang, M., Phama, D. Zhaoc, Y., Denga, D., Lea, W., Zuoa, H., Zhua, T., Liua, Q., Penga, Z., Zhanga, Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 (2017) 620–647.
- [7] E. G., Varuvel, N., Mrad, F. Aloui, M., Tazerout, Experimental analysis of fuel from fish processing industry waste in a diesel engine, *Clean Techn Environ Policy* (2017) 19:1099–1108.
- [8] G., Sakthivel, G., Nagarajan, M., Ilangkumaran, A., Bajirao Gaikwad, Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends, *Fuel* 132 (2014) 116–124.
- [9] Mofijur M, Masjuki HH, Kalam MA, Atabani AE, Shahabuddin M, Palash SM, et al. Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: a review. *Renew Sust Energy Rev* 28 (2013):441–455.
- [10] Singh SP, Singh D. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. *Renew Sust Energy Rev* 14 (2010):200–216.
- [11] Lin CY, Li RJ. Fuel properties of biodiesel produced from the crude fish oil from the soapstock of marine fish. *Fuel Process Technol* 90 (2009):130–136.
- [12] I. Kwon Hong, J. W., Park, S. B., Lee, Optimization of fish-oil-based biodiesel synthesis, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19 (2013) 764–768.
- [13] Behçet R., Performance and emission study of waste anchovy fish biodiesel in a diesel engine, *Fuel Processing Technology*, 92, 1187-1194, 2011.
- [14] N.J. Miller, S.M. Mudge, *Spill Science & Technology Bulletin* 4 (1) (1997) 17.
- [15] A.I. Mohamed, A.S. Hussein, S.J. Bhatena, Y.S. Hafez, The effect of dietary menhaden, olive, and coconut oil fed with three levels of vitamin E on plasma and liver lipids and plasma fatty acid composition in rats. *The Journal of Nutritional Biochemistry* 13 (7) (2002) 435-441.
- [16] C., Lin, R., Li, Fuel properties of biodiesel produced from the crude fish oil from the soapstock of marine fish, *Fuel Processing Technology*, 90 (2009) 130-136.
- [17] M. Hossain, M. Toba, Y. Abe, T., Mochizuki, Y. Yoshimura, Effect of Antioxidant Species on Oxidation Stability of Fish Oil Biodiesel, *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 53, (6), (2010) 75-80.
- [18] F. Aksoy, The effect of opium poppy oil diesel fuel mixture on engine performance and emissions, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 8 (1), (2011) 57-62.
- [19] Eryilmaz, T., Aksoy, F., Aksoy, L., Bayrakceken, H., Aysal, F.E., Sahin, Seda, Y., M. Kadir., Process Optimization For Biodiesel Production From Neutralized Waste Cooking Oil and The Effect Of This Biodiesel On Engine Performance, *CT&F - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 8,121-127, 2018.
- [20] R. Behçet, A comparative study on anchovy fish oil, anchovy fish oil methyl ester and diesel fuels in a diesel engine, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 27(2): (2011) 313-322.
- [21] N., Mrad, E. G., Varuvel, M., Tazerout, F., Aloui, Effects of biofuel from fish oil industrial residue-Diesel blends in diesel engine, *Energy* 44 (2012) 955-963.

- [22] Jiaqiang, E., MinhHieu P., Yuanwang D., Tuannghia N., VinhNguyen D., DucHieu L., Wei Z., Qingguo P., Zhiqing Z., Effects of injection timing and injection pressure on performance and exhaust emissions of a common rail diesel engine fueled by various concentrations of fish-oil biodiesel blends, *Energy* 149 (2018) 979-989.
- [23] Can, Ö., Öztürk, E., Solmaz, H., Aksoy, F., Çinar, C., Yücesu, H.S., Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine, *Applied Thermal Engineering* 95, 115–124, 2016.
- [24] Agarwal, D., Kumarb, L., Agarwal, A.K., Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine, *Renewable Energy*, 33, 1147–1156, 2008.
- [25] Misra, RD. Murthy, MS. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine:a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:3005-3013, 2010.
- [26] Singh, SP. Singh, D., Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:200-216, 2010.
- [27] Karmakar, A., Karmakar, S., Mukherjee, S., Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 101:7201-7210, 2010.
- [28] J.B.Heywood, *Internal Combustion Engines Fundamentals*, (1988) McGraw-Hill, USA.
- [29] H. Zhao, *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*, (2007) Woodhead Publishing Limited, England.
- [30] R. Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines*, (1999) Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013- 0, Tesseraux, I.; Toxicoll, Lett., 2004, 149, 295-300.
- [31] M.M. Andreae, W.K. Cheng, T.Kenney, J. Yang, 2007, On HCCI Knock, SAE Paper 2007-01-1858.
- [32] C. Wildman, R.J. Scaringe, W. Cheng, On the Maximum Pressure Rise Rate in Boosted HCCI Operation, SAE paper (2009) 2009-01-2727.
- [33] J. Eng, Characterization of pressure waves in HCCI combustion, SAE paper (2002) 2002-01-2859.



Farklı Metal Çiftlerinin Mekanik Kilitlenme Yöntemi ile Birleştirilmesi

Serdar MERCAN¹

¹Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, SİVAS

Öz

Malzemeler sökülebilen ve sökülemeyen birleştirme yöntemleri kullanılarak birleştirilirler. Ancak farklı malzeme türlerinin birleştirilmesi söz konusu olduğunda birçok birleştirme yönteminin kullanılması güç ve problemlidir. Bu nedenle farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak uygulamada karşılaşılan bazı problemlerin önüne geçilebilecektir. Yöntem ile seramikler ile metaller, demir esaslı malzemeler ile demir dışı metaller ve diğer malzeme türleri birbirleri ile birleştirilebilir. Bu çalışma kapsamında farklı kimyasal bileşime sahip AISI 1040 ve AA 1050 metal çiftleri mekanik kilitleme ile birleştirilerek yöntemin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Birleştirilen numunelerin mekanik analizleri yapılmış ve mikro yapı incelemeleri tamamlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda farklı malzeme çiftlerinin mekanik kilitleme yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirileceği görülmüştür.

Makale Bilgisi

Başvuru: 27/06/2018

Düzeltilme: 11/11/2018

Kabul: 26/11/2018

Anahtar Kelimeler

Mekanik kilitleme yöntemi

Bi-metal

Metalurjik özellikler

Mekanik özellikler

Plastik şekil verme

Keywords

Mechanical locking method

Bi-metal

Metallurgical properties

Mechanical properties

Plastic forming

Joining of Dissimilar Metal Pairs by Mechanical Locking Method

Abstract

The materials are assembled using assembly and disassembly methods. However, when the joining of dissimilar material types comes into question, it is difficult and problematic to use many joining methods. For this reason, some problems encountered in the application can be prevented by using the mechanical locking method for joining of dissimilar material types. Ceramics and metals, ferrous materials, non-ferrous metals and other material types can be joined with each other by using the method. In this study, the applicability of the method was investigated by joining AISI 1040 and AA 1050 metal pairs with different chemical compositions via mechanical locking method. Mechanical analyses of the joined samples were carried out and microstructure studies were completed. As a result of this study, it was observed that different material pairs will be successfully joined by using the mechanical locking method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde farklı metal çiftleri birleştirilerek, birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalara; dış yüzeyinin sert, iç kısımlar ve bağlantı bölgesinde tokluk değerinin yüksek olması gereken bimetalik çekiçler, korosif ve abrasif etkileri minimize etmek amacı ile yapılan bimetalik kovanlar, termostatik esaslara dayalı olarak çalışan bimetal plakaların kullanıldığı kondensstoplar ve bimetal kablo pabuçları gibi birçok örnek gösterilebilir. Bununla birlikte endüstrideki enerji ve çevre sorunlarının, malzeme seçimi ve birleştirme tekniklerinin geliştirilmesi üzerinde güçlü etkisi devam etmektedir [1].

Endüstriyel uygulamalarda birçok alanda malzemelerin birleştirilmesinde kaynak yöntemi kullanılır. Ancak malzemeler arasında kimyasal uyumsuzluk söz konusu ise bu malzemelerin kaynak yöntemi ile birleştirilmesi neredeyse imkânsızdır [2]. Bununla birlikte kaynak hataları nedeni ile meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde olumsuz rol oynamaktadır [3]. Bu nedenle bu çalışma kapsamında; farklı kimyasal bileşime sahip malzeme türlerinin, yeni bir imalat yöntemi olan mekanik kilitleme ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Böylece bimetalik uygulamalar ile, ihtiyaca uygun farklı malzeme çiftlerinin birlikte kullanılabilmesi ve malzeme üretim maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Mekanik kilitleme yöntemine ait TR201503256B no' lu patent işlemleri 2017 yılında tamamlanmıştır [4].

Metal imalat tekniklerinde ısı kullanılması yaygın bir uygulamadır. Bunlar arasında döküm, kaynak, kesme, sıcak şekillendirme, dövme veya toz metalurjisi gibi metal imalat teknikleri bulunmaktadır. Belirli bir ısı çevrim, başarılı üretim ve ürün kalitesi için büyük önem taşımaktadır [5]. Bu çalışma kapsamında seçilen mekanik kilitleme yönteminde, sürtünmeden elde edilen ısı etkisi farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde kullanılmıştır. Mekanik kilitleme yöntemi ile demir esaslı malzemeler demir dışı metaller, kompozit malzemeler ve seramik malzemeler gibi birçok malzeme türü birbirleri ile birleştirilebilir. Bu amaçla; bu yöntem kullanılarak birleştirilecek iki parçadan, biri erkek parça diğeri dişi kalıp parçası olarak tasarlanır. Birleştirilecek iki malzeme türü arasında ergime ısısı yüksek olan parça, kalıp parçası olarak seçilir. Kalıp parçasının üzerine farklı ölçülerde konik kanal veya T kanal açılır. Erkek parça olarak hazırlanan malzemenin plastik şekil değiştirme özelliğine sahip bir malzemeden seçilmesi gerekmektedir [4]. Parçaların ön hazırlıkları tamamlanarak, erkek parçanın kalıp parçası üzerinde açılan kanal içi ara yüzeyinde dönerek sürtünmesini ve aralarında aksel basınç oluşmasını sağlayacak bir sistem tasarlanır. Bu sistem içinde üretilen mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılır. Sürtünme hareketi, sürtünme kaynak yönteminde olduğu gibi plastik deformasyon sıcaklığına ulaşıncaya kadar devam eder. Parçaların sürtünmekte olan yüzeylerinde, ısı açığa çıkar ve basınç etkisi ile erkek parça yığılmaya başlar. Yığılan malzemenin kalıp şeklini alması sağlanır. Bağlantı; ara yüzeyde oluşturulan sürtünme ve açığa çıkan ısıya bağlı meydana gelen bir kaynaklı bağlantı olmayıp, kalıp parçası üzerine açılan T kanal veya konik kanal yardımı ile gerçekleştirilir. Erkek parçanın kalıp parçasının şeklini alması sonucunda sürtünme hareketi durdurulur [4]. Sürtünme hareketinin ani olarak durdurulması ara yüzeylerde meydana gelebilecek olası bölgesel kaynakların bozulmasını engeller. Mekanik kilitleme yönteminin uygulanmasında klasik sürtünme kaynak tezgâhları kullanılabilir. Mekanik kilitleme yönteminde, sürtünme kaynağında olduğu gibi malzeme çiftlerinde atomik seviyede bir birleştirme olmaz. Bu nedenle yöntem parametreleri, sürtünme kaynak parametrelerinden bağımsız olarak değerlendirilir. Ancak kullanılacak parametreler isim olarak benzerlik göstermektedir. Sürtünme kaynak yönteminde metalurjik bir bağ oluşturmak amacı ile belirlenen parametreler, mekanik kilitleme yönteminde erkek parçanın mekanik özelliklerini kaybetmeden hamurumsu hale getirilmesi amacıyla belirlenir. Bu parametreler sürtünme süresi, devir sayısı ve sürtünme basıncıdır. Diğer taraftan bağlantı kalitesi üzerinde önemli etkisi bulunacağı düşünülen, kalıp parçası kanal derinliği, bağlantı açısı, kanal köşe yarıçaplarının malzeme özelliklerine uygun olarak belirlenmesi gerekir.

Yöntemde ihtiyaç duyulan enerji sürtünme yolu ile elde edilmektedir. Ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta malzemelere aksel bir basıncın uygulanması gerekmektedir. Basıncın etkisi ile oluşturulan plastik deformasyon yardımı ve kanal şekline bağlı olarak sökülemeyen mekanik bir birleşme sağlanmaktadır [4]. Yöntem ergime sıcaklıkları arasındaki farkın büyük olduğu farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde de sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Yöntemin dezavantajı ise birleştirme işlemi öncesinde parçaların talaşlı imalat gibi yöntemler ile ön hazırlığının yapılması gerekmektedir. Ayrıca parça boyutlarının artması ile birleştirme işlemi için daha büyük ve güçlü tezgâhlara ihtiyaç duyulmaktadır. Parça boyutlarının daha küçük olması durumunda ise talaşlı imalat işlemleri zorlaşmaktadır.

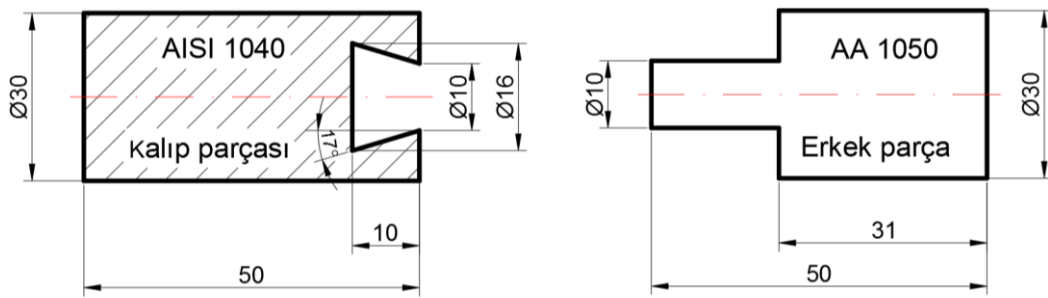
Konu ile alakalı yapılan çalışmalarda; Cong Wang ve arkadaşları hızlı soğutma oranı ve büyük sıcaklık gradyanı ile homojen olmayan plastik deformasyonun malzemeler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kalıntı gerilmelerin kalınlık açısından tekdüze olmadığını ve yüzeyde sıkıştırıcı, daha sonra derinlikle birlikte mutlak büyüklükte arttığını ve merkezde gerilme meydana getirdiğini bildirmiştir. Ekstrüzyon yönünde küçük akış gerilmesinin kalıntı gerilmeleri azalttığını tespit etmiştir [6]. Robinson vd. ısı işlem görmüş alüminyum alaşımlarında alaşım bileşiminin artık gerilmeler üzerindeki etkisini incelemişler ve homojen olmayan plastik akışın malzemeler üzerinde kalıntı gerilmeler meydana getirdiğini bunun mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini bildirmiştir [7]. Zheng ve diğerleri; Mg-3Al-Zn alaşımlı levhaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygun bir alaşım ve haddeme yöntemi araştırmıştır. Sıcak haddelenmiş alaşımların ön-ekstrüzyona tabi tutulduğunu ve Al-Si alaşımlama ilavesinin farklı bir bimodal dağılım karakteristiği ve optimal tane arıtımı sergilediğini bildirmiştir [8]. Xue tarafından Al esaslı negatif poisson oranına sahip bir malzemeyi 3-D ve döküm yöntemi ile üreterek mekanik davranışları araştırılmış ve ek olarak dikme yapılmasının veya dikmelerin giriş açısının uzunluğunun arttırılmasının sıkıştırma mukavemetini azalttığını poisson oranını ise arttırdığını bildirmiştir [9]. Kai, ekstrüze edilmiş yuvarlak profil alüminyum alaşım için deformasyon dokusu ve onun kalınlık heterojenitesi, elektron geri-saçılım difraksiyon tekniği (EBSD) ile deneysel olarak ölçmüş ve FEM akış simülasyonu ve kristal plastisite simülasyonları birleştirerek sayısal olarak modellemiştir [10]. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde;

mekanik kilitleme yönteminin günümüz imalat yöntemleri içinde kullanılmadığı görülmüş olup bu bakımdan çalışmanın literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın ana amacı, farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip malzeme türlerinin mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak birleştirilmesini incelemektir. Bu amaçla, birleştirilen AISI1040 ve AA 1050 malzeme çifti üzerinde bağlantı mikro yapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında mekanik kilitleme yönteminin diğer imalat yöntemleri ile birleştirilemeyen malzeme türlerinin birleştirilmesinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak birleştirilecek numunelere şematik görünüşü Şekil 1' de verilmiştir. Erkek parça kalıp parçası üzerindeki kanal içinde gerekli olan sürtünme hareketini sağlayacak şekilde ve plastik şekil değiştirme sonucunda kanal içini doldurabilecek boyutlarda imal edilmiştir.



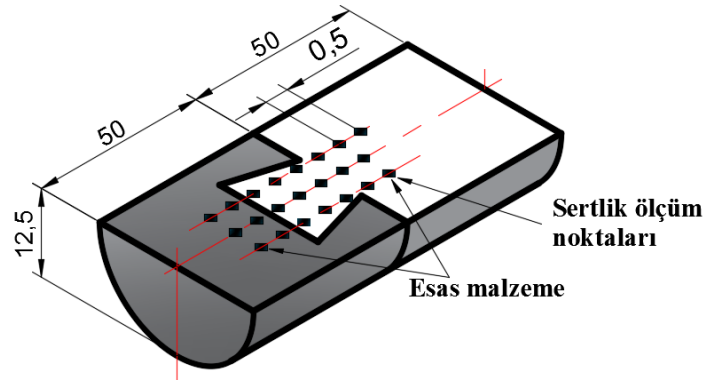
Şekil 1. Mekanik kilitleme yönteminde kullanılan numune boyutları (mm)

Bu çalışmada; numuneler sürtünme süresi boyunca 40 MPa sabit basınç altında ve 2500 min⁻¹ dönme hızı seçilerek hazırlanmıştır. Sürtünme işlemi erkek parça ve kalıp parça alın altına birleştirilinceye kadar devam ettirilmiştir (6 s). Birleştirilen numunelere ait spektral analiz sonucu elde edilen kimyasal kompozisyon Tablo 1' de, verilmiştir.

Tablo 1. AISI 1040 ve Al 1050 malzeme çiftlerine ait kimyasal kompozisyon (% Ağırlıkça)

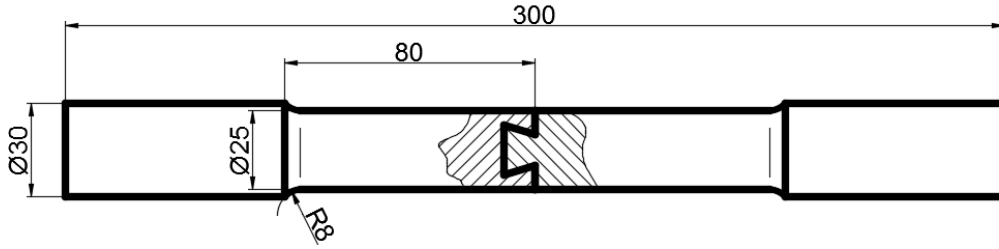
	C	Mn	Si	Mg	Cu	S (max)	Al	Fe
AISI 1040	0,42	0,55	0,30	---	---	0,035	---	Balans
AA 1050	---	0,002	0,25	0,05	0,05	---	Balans	0,4

Birleştirilen numunelerin ara yüzeylerindeki temas hattı boyunca Şekil 2' de gösterildiği gibi üç farklı doğrultuda, matris malzemesine kadar mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Vickers sertlik ölçümleri 10 N yük altında ve 0,5 mm aralıklarda ve 15 s bekleme süresi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2. Mikro sertlik ölçüm bölgeleri (mm)

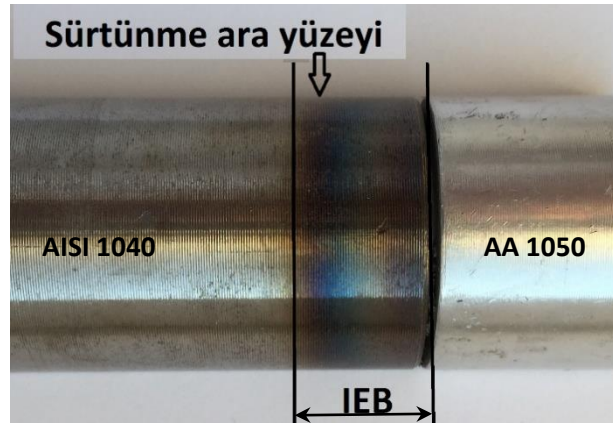
Çekme deney numuneleri; TS EN ISO 6892-1/Mart 2011 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Şekil 3’ te çekme deney numunesine ait şematik görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3. Çekme deney numunesi şematik görüntüsü

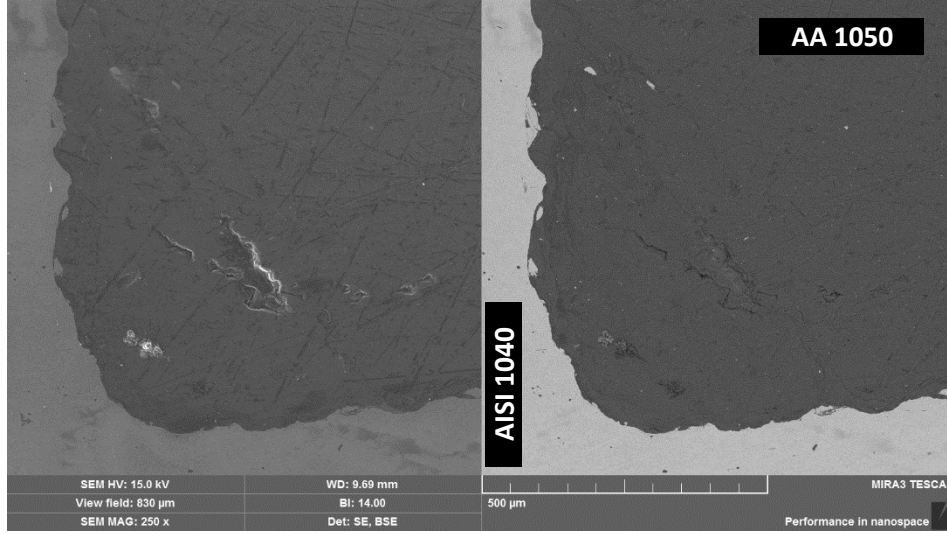
3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

AISI 1040 ve AA 1050 gerek ergime sıcaklıklarındaki fark, gerekse kimyasal farklılıkları nedeni ile kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi mümkün değildir. Mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak birleştirilen numunenin makro görüntüsü Şekil 4’ te gösterilmiştir. Isı iletim katsayısının düşük olması ve sürtünme ara yüzeyinin çelik malzeme içinde kalması nedeni ile AISI 1040 malzeme üzerinde ısıdan etkilenen bölge (IEB) net olarak görülmektedir. IEB’ nin sürtünme ara yüzey doğrultusunda arttığı parçanın diğer kısımlarında ise daha az olduğu görülmektedir. AA 1050 alaşımlı malzemelerin ısı iletim katsayısının çeliklere kıyasla daha yüksek olması nedeni ile sürtünme ara yüzeyinde meydana gelen ısı Al malzeme tarafından hızla uzaklaştırılmıştır. Ayrıca AA 1050 malzemenin görülebilen dış yüzeyinin sürtünme bölgesinden uzak olması nedeni ile AA 1050 malzeme tarafında ısıdan etkilenen bölgeler görülmemiştir.



Şekil 4. Birleştirilen numunelere ait makro fotoğraf

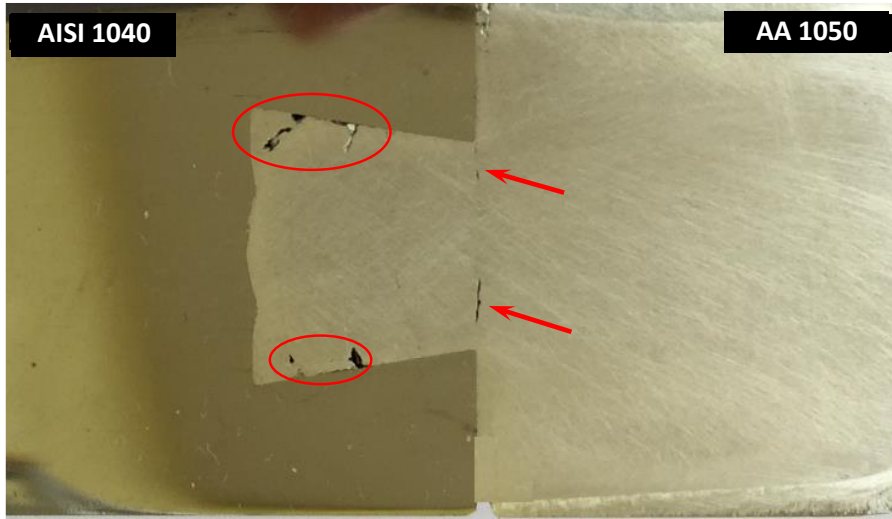
Al ısı genleşme katsayısı çeliklere göre yaklaşık iki kat daha yüksektir (Isıl genleşme katsayıları -oda sıcaklığında $\alpha_{Al}=23,6 \cdot 10^{-6} 1/C^{\circ}$, $\alpha_{Fe}=12 \cdot 10^{-6} 1/C^{\circ}$) [11]. Ancak Al ısı iletim katsayısının çeliklere göre yaklaşık dört kat yüksek olması nedeni ile Al üzerindeki ısı hızla çelik tarafına iletilerek genleşmeye bağlı problemlerin önüne geçilmiş ve birleştirilen parçaların alın yüzeylerinin tam temas etmesi sağlanmıştır ($k_{Al}=247 W/m.K$, $k_{Fe}=52 W/m.K$) [11]. Isıl genleşme katsayısı çeliğin yaklaşık iki katı olan alüminyumun kalıp parçasının içinde tam olarak şekil alması ve soğuma sonrası boşluk oluşmasını engellemek amacıyla yeterli sürtünme basıncının uygulanması gerekmektedir. Al malzemenin sürtünme basıncı etkisi ile plastik deformasyon sonucunda boşluksuz bir şekilde kalıbın şeklini aldığı ve kalıbın içini doldurduğu Şekil 5’ te verilen SEM görüntüsü ve Şekil 6’ da verilen ara yüzey makro görüntüsünde gösterilmiştir.



Şekil 5. Birleştirilen numune SEM görüntüsü

AISI 1040 ve AA 1050 malzeme çifti farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmaları nedeni ile farklı plastik deformasyon miktarları sergilerler [12]. Çeliklerin mekanik özellikleri alüminyuma göre daha yüksektir. Bu nedenle bağlantı esnasında meydana gelen deformasyon AA 1050 tarafında meydana gelmiştir. AISI 1040 çelik tarafında hemen hemen hiç deformasyon meydana gelmediği tespit edilmiştir (Şekil 6).

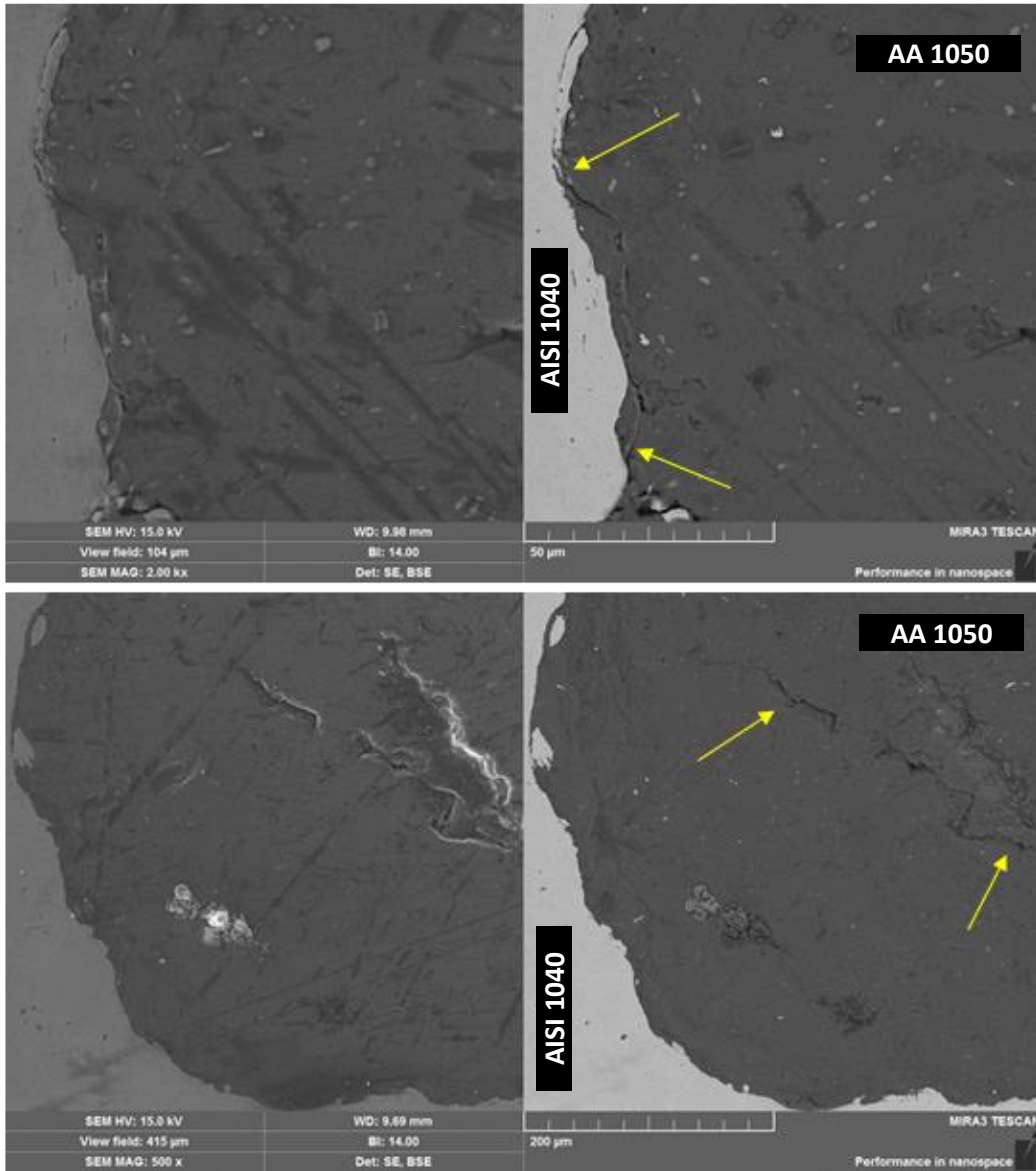
Şekil 6' de verilen makro görüntüde birleşme ara yüzeylerine yakın bölgelerde dairesel alan içinde gösterilen kısımlarda AA 1050 tarafında porozite olduğu tespit edilmiştir. Al ve Mg gibi kimyasal olarak aktif malzemelerin üretiminde, inklüzyon, büzülme, gözeneklilik gibi metalurjik defektlerin meydana geleceği bilinmektedir [9]. Bağlantı ara yüzeyine yakın bölgelerde oluşan bu porozitenin yeterli ısı ve basıncın kullanılmamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Basıncın yetersiz olması metal akışını olumsuz etkilemektedir. Benzer bir durum farklı bir birleştirme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağında daha önce tanımlanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağında yetersiz metal akışının ve düşük sıcaklıkların karıştırma bölgesinde porozite oluşumuna neden olduğu görülmüştür [13].



Şekil 6. Birleştirilen numune makro fotoğrafı

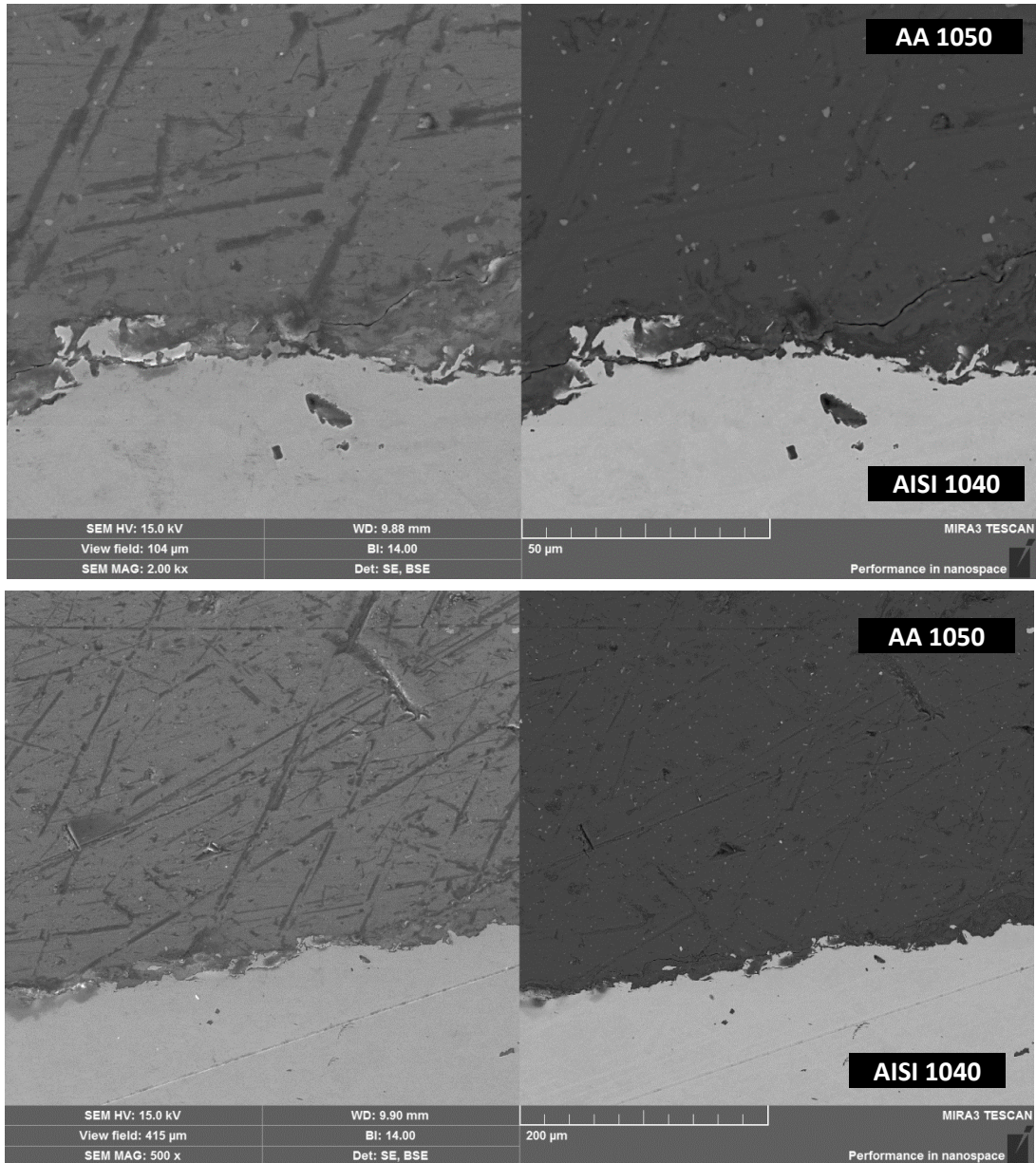
Bununla birlikte Şekil 6’ da oklarla gösterilen kısımlarda AA 1050 malzeme üzerinde çatlaklar gözlemlenmiştir. Çatlak oluşumunun ısınan AA 1050 malzemede kesitin daralmaya başladığı kısımda meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun; daha önce yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi alüminyumun hacimce daralmasından kaynaklanan çekme boşlukları olarak meydana geldiği düşünülmektedir [14].

AA 1050 tarafında, birleşme bölgesine yakın kısımlarda basınç etkisi ile yönlendirilen tanelerin hızlı soğuması sonucunda mikro çatlaklara neden olduğu Şekil 7’ de verilen SEM görüntüleri ile gösterilmiştir. Mikro çatlakların bağlantı sınır bölgesine yakın oldukları ve uzun bir hat boyunca ilerledikleri tespit edilmiştir. Mikro çatlaklar hızlı plastik deformasyonun meydana getirdiği çekme etkisi ve düzensiz soğuma nedeni ile oluşmuştur [15]. Söz konusu mikro çatlak oluşumunun katılaşma sırasında yetersiz besleme nedeni ile oluşan çekme, sıvı metal içerisinde çözünmüş olan fazla hidrojen veya her ikisinin etkisi ile meydana geldiği bilinmektedir. Ancak gaz porozitelerinin yuvarlak ve düzenli görünümüne sahip olduğu belirtilmiştir [16]. Bu nedenle oluşan porozite şeklinin gaz porozitesi olmadığı ve literatürde bildirildiği gibi çekmeye bağlı olarak meydana gelen porozite şekline benzemesi olması bu sonucu doğrular niteliktedir.



Şekil 7. Çatlak oluşumunun SEM görüntüsü

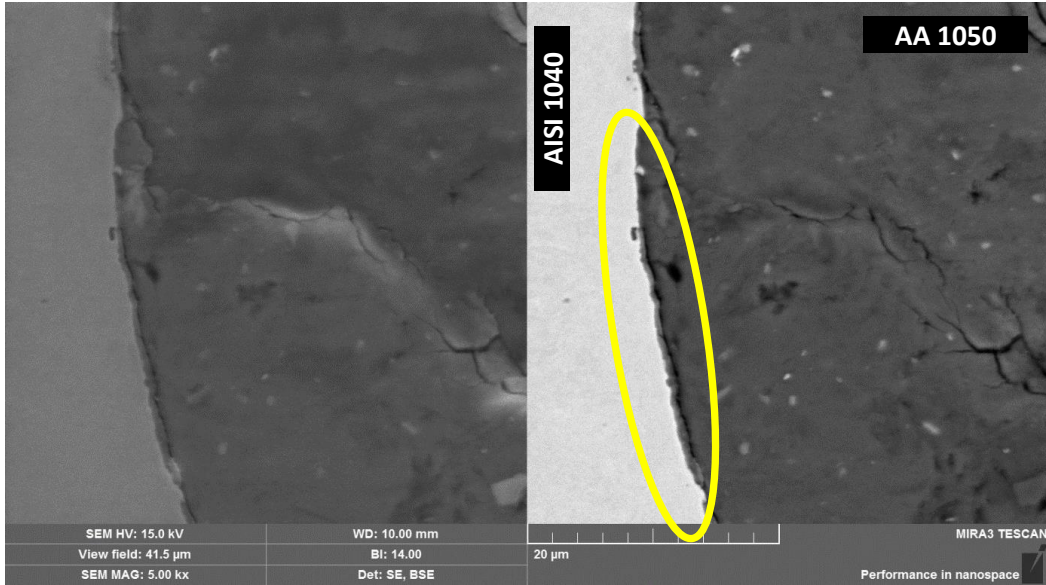
Atomların materyaller arasında dağılması için yeterli ısı, difüzyon zamanı ve basıncın gerekli olduğu iyi bilinmektedir [17]. Yapılan bu çalışmada ise numuneler arasında gerçekleşen difüzyon miktarının çok az olduğu Şekil 8’ de verilen SEM görüntülerinde açıkça görülmektedir. Şekil 8 incelendiğinde temas yüzeylerine çok yakın bölgelerde bile difüzyonun yetersiz olduğu görülmüştür. Bu nedenle mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak birleştirilen AISI 1040 ve AA 1050 malzeme arasında difüzyon için sıcaklık, basınç ve sürenin yeterli olmadığı düşünülmektedir [18]. Difüzyon süresi ve difüzyon miktarı çalışma parametrelerine bağlıdır ve sıcaklık ile bağlanma tipine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [19,20]. Bu nedenle mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak birleştirilecek malzeme çiftleri arasındaki difüzyon miktarının parametrelere bağlı olarak artırılabilirliği düşünülmektedir.



Şekil 8. Birleşme ara yüzeyi SEM görüntüsü

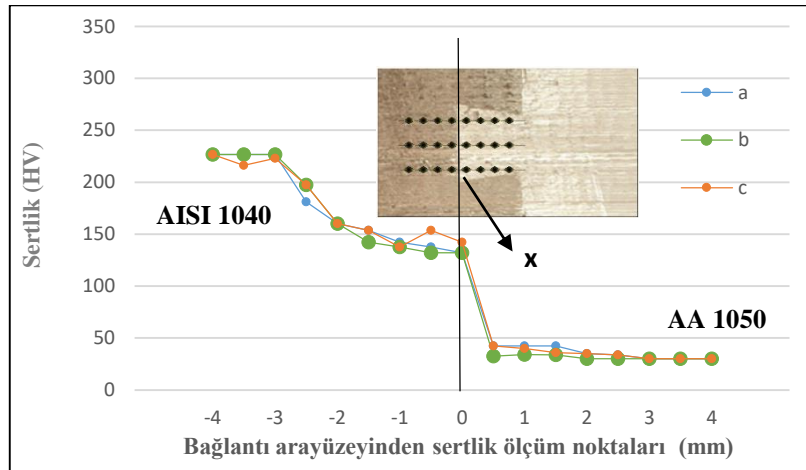
Sinterlenmiş metallerin birleştirilmesinde partikül yüzeyinde oluşan oksit filmleri, atomik difüzyonu yani bağlanmayı engelleyen bir olumsuzluktur. Basıncın yüksek tutulması yüzeyde olabilecek oksit filmlerinin sıcak presleme sürecinde ısı ve yük tesiri altında kırılarak difüzyonu engelleyici etkileri azaltacağı bilinmektedir [21]. Bu çalışmada parça ara yüzeyinden alınan analiz sonuçlarına göre belli oranda oksitlenmenin meydana geldiği görülmüştür. Ara yüzeyde oluşan oksit tabakasının yeterli ısı ve basınç yardımı ile kırılabileceği ve difüzyon miktarının belirtildiği gibi arttırılabileceği görülmüştür.

Diğer taraftan intermetalik oluşumunun Fe ve Al arasında difüzyon oluşumunu engellediği bilinmektedir [21]. Şekil 9' da verilen SEM görüntüsünde ara yüzeyde oluşan intermetalik difüzyonun meydana gelmesi için gerekli ısı enerjisinin ve sürenin sağlanamadığı görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında malzemelerin birbirine sadece mekanik olarak bağlandıkları, taneler arası difüzyonun olmadığı tespit edilmiştir.



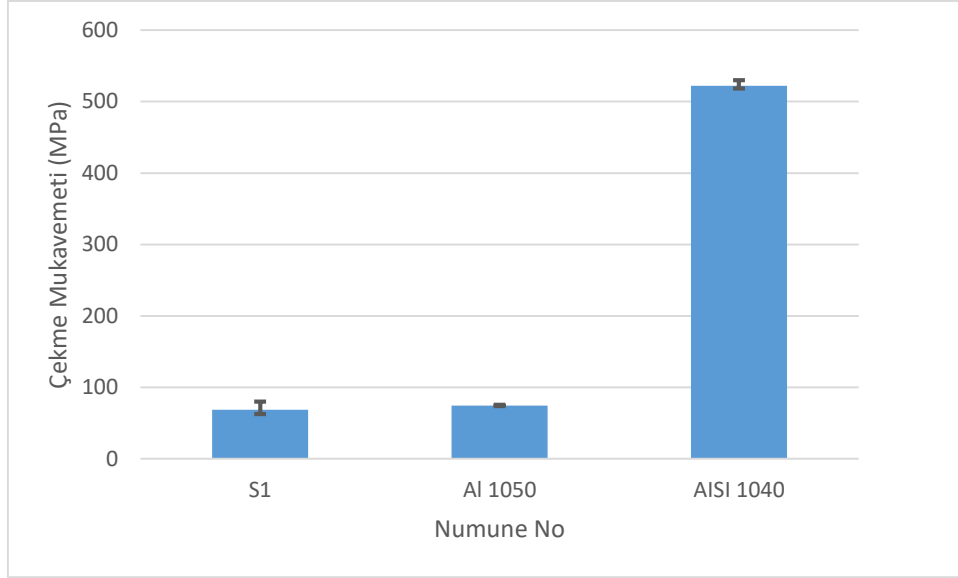
Şekil 9. Bağlantı ara yüzeyinde oluşan intermetalik yapı

AISI 1040 malzeme ortalama sertlik değeri 226 HV AA 1050 malzeme ortalama sertlik değeri 30 HV olarak ölçülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri birleşme ara yüzeyinden her iki tarafa doğru, birbirine paralel üç farklı doğrultuda (Şekil 10 a,b,c doğrultularında) yapılmış, sürtünme yüzeyi ve yan yüzeylerde meydana gelen mikro sertlik değerleri tespit edilmiştir. Üç doğrultudan elde edilen mikro sertlik profilleri birbirine benzerdir (Şekil 10). AISI 1040 tarafında ara yüzeye yakın bölgelerde sertlik değerinin oluşan sıcaklık nedeni ile azalarak yaklaşık 132 HV ye kadar düştüğü görülmüştür. AA 1050 tarafında ise sertlik değeri ara yüzey ve bağlantı boyunca önemli bir değişiklik göstermemiştir. AA 1050 alaşımı tarafında yeniden kristalleşmiş bölge ile matrisin sertliklerinin yaklaşık aynı olduğu görülmüştür. Ancak Şekil 10 üzerinde “x” ile gösterilen köşe kısımlarda sertlik değerlerinin yaklaşık 2 mm mesafede, bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun plastik şekil değişimine bağlı olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir [22].



Şekil 10. Bağlantı ara yüzeyinde meydana gelen mikro sertlik dağılımları

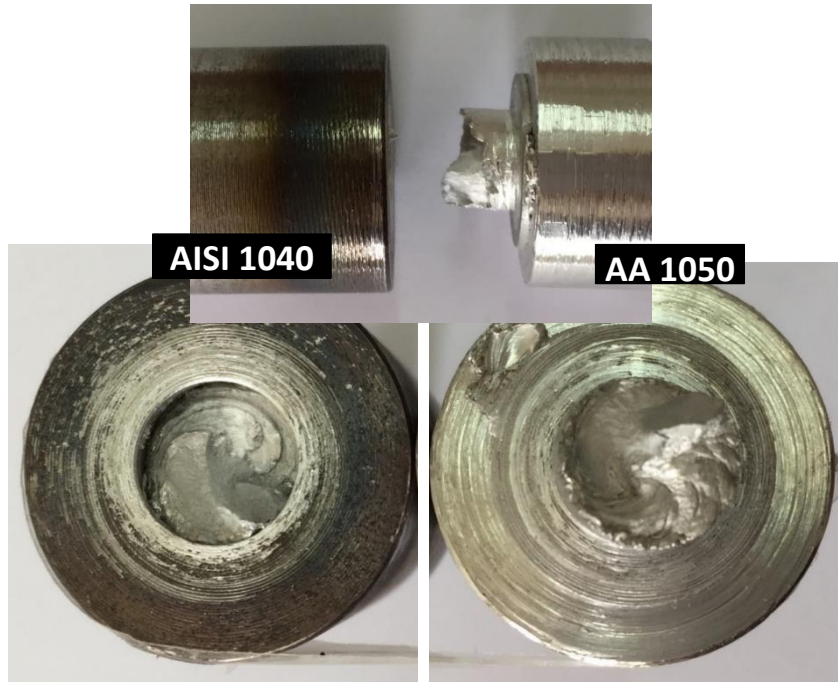
AISI 1040 ve AA 1050 ana malzemeler ve birleştirilen numunelere ait çekme deney sonuçları Şekil 11’ de standart sapma değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Deney sonuçları farklı malzeme çiftleri kullanılarak mekanik kilitleme yöntemi ile ana matrisin mekanik özelliklerine sahip bağlantılar elde edilebileceğini göstermektedir. Farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde kaynaklı numunelerin mukavemeti ile orijinal malzemelerin mukavemeti kıyaslandığında, kaynaklı numunelerin mukavemetinin daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak birleştirilen farklı metal çiftlerinin bağlantı mukavemetinin birleştirilen AA 1050 malzeme mukavemetine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 11. Çekme deney sonuçları

AA 1050 birleştirilme sürecinde yüksek oranda ve düzensiz oluşan bir plastik deformasyona maruz kalmıştır. Çelik ve Al arasındaki ısı iletim katsayısı arasındaki büyük farklılıklar düzensiz bir soğumanın meydana gelmesine neden olmuştur. Hızlı soğuma oranı ve büyük sıcaklık gradyanı homojen olmayan plastik deformasyon ve bunlara bağlı artan kalıntı gerilmeler meydana gelmiştir [6]. Ayrıca seçilen parametreler nedeni ile her iki malzeme tarafında önemli miktarda difüzyonun meydana gelmediği ve gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. Yukarıda yazılan bu sebepler bağlantı mukavemetini azaltan ana etkenler olarak ortaya çıkmıştır.

Şekil 12' de çekme deneyi sonucunda kopan numunelere ait makro görüntü verilmiştir. Çekme deneyi sonucunda AA 1050 malzemenin kesitin daraldığı noktadan kopmadığı görülmüştür. AA 1050 tarafında malzemenin kalıp parçası içinden yırtılarak ayrıldığı görülmüştür.

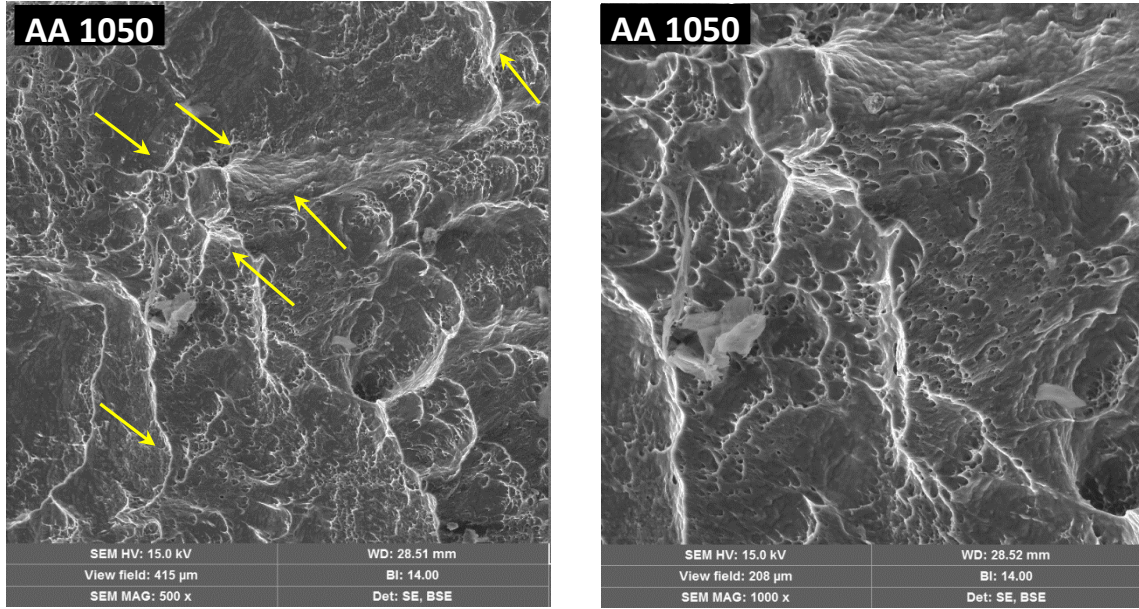


Şekil 12. Çekme deneyi sonucu kırılan numunelere ait makro görüntü

Kopmanın gerçekleştiği kesitin, ısı etkisinde kalan ve yüksek deformasyona uğrayan bölgeye yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun deformasyon bölgesinde oluşan mikro çatlaklar ve düzensiz deformasyona

bağlı olarak meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca yönlü olarak katılmış mikro yapının neden olduğu anizotropik davranışın kırılma üzerinde olumsuz olarak etkili olduğu düşünülmektedir [23].

Çekme deneyi sonucunda kırılan yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 13’ te gösterilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek oranda bulunan çatlakların birleşerek kırılmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Kırılmanın AA 1050 tarafında sünek kırılma olarak meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 13. Çekme deney sonucu kırılan numunelere ait SEM görüntüsü

4. SONUÇ (CONCLUSSION)

Mekanik kilitleme yöntemi kullanılarak AISI 1040 ve AA 1050 metal çiftleri başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında mekanik kilitleme yönteminin diğer imalat yöntemleri ile birleştirilemeyen malzeme türlerinin birleştirilmesinde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Böylece döküm ve kaynak yöntemi gibi diğer yöntemler ile birleştirilemeyen, kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı olan malzeme türlerinin birleştirilmesinde yöntemin uygulanabileceği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında malzemelerin birbirine sadece mekanik kilitleme ile bağlandıkları, taneler arası difüzyon olmadığı ve bağlantı ara yüzeylerinde gözenekler meydana geldiği tespit edilmiştir. Bağlantı mukavemetini olumsuz etkileyen bu faktörlerin kullanılan parametrelerin optimizasyonu ile azaltılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] <https://www.hindawi.com/journals/jma/si/425934/cfp/> Erişim tarihi 13.05.2018.
- [2] Mercan S., Özdemir N., (2013). AISI 2205 / AISI 1020 malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi, NWSA-Technological Applied Sciences, 8/2, 15-34.
- [3] Liu G.L., Yang S.W., Han W.T., Zhou L.J., Zhang M.Q., Ding J.W., Dong Y., Wan F.R., Shang C.J., Misra R.D.K., (2018). Microstructural evolution of dissimilar welded joints between reducedactivation ferritic-martensitic steel and 316L stainless steel during the post weld heat treatment, Materials Science & Engineering A 722 182–196.
- [4] Mercan S., (2017), Mekanik kilitleme yöntemi, Türk Patent ve Marka Kurumu, No: TR 2015 03256 B 2017/05/22.
- [5] Çöl M., Yılmaz M., (2006). Yüksek frekanslı indüksiyon kaynağından sonra X52 mikroalyajlı çeliklerin ısıl işlem parametrelerinin belirlenmesi, Malzeme ve Tasarım 27 507–512.
- [6] Wang C., Luo T., Zhou J., Yang Y., (2018). Effects of solution and quenching treatment on the residual stress in extruded ZK60 magnesium alloy, Materials Science & Engineering A 722 14–19.
- [7] Robinson J.S., Redington W., (2015). The influence of alloy composition on residual stresses in heat treated aluminium alloys, Mater. Charact. 105 47–55.

- [8] Zheng L., Nie H., Zhang W., Liang W., Wang Y., (2018). Microstructural refinement and improvement of mechanical properties of hot-rolled Mg–3Al–Zn alloy sheets subjected to pre-extrusion and Al-Si alloying, *Materials Science & Engineering A* 722 58–68.
- [9] Xue Y., Wang X., Wang W., Zhong X., Han F., (2018). Compressive property of Al-based auxetic lattice structures fabricated by 3-D printing combined with investment casting, *Materials Science & Engineering A* 722 255–262.
- [10] Zhang K., Marthinsen K., Holmedal B., Aukrust T., Segatori A., (2018). Through thickness variations of deformation texture in round profile extrusions of 6063-type aluminium alloy: Experiments, FEM and crystal plasticity modelling, *Materials Science & Engineering A* 722 20–29.
- [11] https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjvvhZOLienYAhVDECwKHxhQBUIQFgg2MAI&url=http%3A%2F%2Fakademi.itu.edu.tr%2Fatahanh%2FDosyaGetir%2F74205%2Fch11_Termal&usg=AOvVaw1ZpBm09PFACc3O7mGql_5z/ Erişim tarihi 21.01.2018.
- [12] Acarer M., Demir H., (2008). An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum dual phase steel, *Mater Letters*, 62, 4158-4160.
- [13] Erdem M., (2015). Investigation of structure and mechanical properties of copper-brass plates joined by friction stir welding, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 76: 1583–1592.
- [14] Tunçay T., Özyürek D., (2014). Al-Si-Mg döküm alaşımlarında filtrasyonun mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29: 2, 271-279.
- [15] Kayıkçı R., (2004). Use of computer modelling in predicting microporosity in a commercial aluminum casting, *World Founder Congress*, 66, İstanbul.
- [16] Shabestari S. G., Shahri F., (2004). Influence of modification, solidification conditions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy, *Kluwer Academic Publishers*, 2023-12032.
- [17] Balasubramanian M., (2015). Development of processing windows for diffusion bonding of Ti–6Al–4V titanium alloy and 304 stainless steel with silver as intermediate layer. *Transactions. Nonferrous Metals Society, China*, 25, 2932–2938.
- [18] Aydın M., (2008). Gözenekli seramik malzeme ile paslanmaz çeliğin difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23:3, 595-599
- [19] Atasoy E, Kahraman N., (2008). Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer, *Materials Characterization*, 59, 1481–1490.
- [20] Cheng X., Gao Y., FU H., Xing J., Bai B., (2010). Microstructural characterization and properties of Al/Cu/steel diffusion bonded joints, *Metals and Materials International*, 16:4, 649–655.
- [21] Arık H., Semerci P., Kırmızı G., (2017). Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al₂O₃ takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması, *GU J Sci, Part C*, 5(4): 87-97, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: Tasarım ve Teknoloji*.
- [22] Meriç C., Köksal N.S., M. Erdoğan T., Okur A., (2008). Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi, *Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 4.2 135–144, ISSN 1305-1385.
- [23] Saarimäki J., Lundberg M., Brodin H., Moverare J.J., (2018). Dwell-fatigue crack propagation in additive manufactured Hastelloy X, *Materials Science & Engineering A* 722, 30–36.
- [24] Başak H., (2015). Haddelme (Galetaj) ile 5083 Al-Mg malzeme yüzeyinin işlenmesi, haddelme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi, *GU J Sci, Part:C*, 3(2): 471-476, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART:C, Tasarım Ve Teknoloji*
- [25] BAYAR H., SUBAŞI M., KARATAŞ Ç., (2015). 2SiC Takviyeli Alüminyum Alaşım Matrisli Kompozit Malzemenin Yüksek Basıncılı Kalıp Dökümü ve Mekanik Özellikleri, *GU J Sci, Part, C*, 3(4):603-612, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: Tasarım ve Teknoloji*.



Kablosuz Güç Aktarımı İçin Karşılıklı Endüktans Hesaplama Aracının Geliştirilmesi

Orhan KAPLAN

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Beşevler/ANKARA

Öz

Kablo karmaşıklığını ve cihazlar arasındaki bağlantı terminali farklılığını ortadan kaldırmayı amaçlayan kablosuz güç aktarım sistemleri günümüzde cep telefonu, diş fırçası, tıraş makinası ve elektrikli taşıtlar gibi birçok alanda geniş kullanıma sahiptir. Yapılan çalışmalar aktarılan güç miktarının ve sistem veriminin alıcı-verici bobinler arasındaki mesafeyle ters orantılı değiştiğini göstermektedir. Kablosuz güç aktarım sistemi tasarlanırken alıcı-verici bobinler arasındaki uygun mesafenin belirlenmesi sistemin yüksek verimle çalışabilmesi için gereklidir. Sonlu elemanlar analizi yapan birçok yazılım alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin uygun değerinin belirlenmesinde kullanılabilmesine rağmen ve bu yazılımlar uzmanlık gerektiren karmaşık yapıya sahiptir. Bu çalışmada, düşük maliyetli, basit kullanımlı karşılıklı endüktans hesaplama aracı tanıtılmıştır. Karşılıklı endüktans değerinin, sabit frekansta endüktif kablosuz güç aktarım sistemlerinde verimi doğrudan etkilediği göz önünde bulundurulduğunda, alıcı-verici bobinler arasındaki mesafeyle verim ilişkisinin analiz edildiği bir araç geliştirilmiştir. Geliştirilen hesaplama aracı hava nüveli özdeş iki bobin arasındaki farklı mesafe ve hizalanma değerleri için karşılıklı endüktans ve bobinlerin öz endüktans değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilen benzersiz bir uygulamadır. Bunlara ilaveten tasarlanan görsel ara yüz sayesinde, bobinlerin konumu üç boyutlu koordinat sisteminde değiştirilebilir ve karşılıklı endüktans değerinin mesafeyle değişimini gösteren eğriler oluşturulabilir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 29/10/2018

Düzeltilme: 27/11/2018

Kabul: 13/12/2018

Anahtar Kelimeler

Kablosuz güç aktarımı,
karşılıklı endüktans,
bağlantı katsayısı,
endüktif güç aktarımı,
eşdeğer devre

Keywords

Wireless power transfer,
mutual inductance,
coupling coefficient,
inductive power transfer,
equivalent circuit

THE DEVELOPMENT OF MUTUAL INDUCTANCE COMPUTATION TOOL FOR WIRELESS POWER TRANSFER

Abstract

Wireless power transmission systems, which aim to eliminate cable complexity and the difference between the connection terminals of devices, are now widely used in many areas such as mobile phone, toothbrush, shaver and electric vehicles. Studies show that the amount of power transferred and the system efficiency are inversely proportional to the distance between the transceiver coils. Therefore, while the wireless power transmission system is designed, it is necessary to determine the optimum distance between the transceiver coils in order for the system to operate at high efficiency. Although many software systems using finite element analysis can be used to determine the appropriate value of the distance between the transceiver, these softwares has a complex structure that requires expertise. In this study, a mutual inductance calculation tool low-cost, simple-to-use is introduced. Considering that the mutual inductance value directly affects the efficiency of the fixed frequency inductive wireless power transmission systems, a tool has been developed in which the relationship between the distance of transceiver and the efficiency is analyzed. The developed calculation tool is a unique application that can be used to calculate the mutual inductance and self-inductance values of the two identical coils with air-core for the different distance and alignment values. In addition, thanks to the visual interface designed, the position of the coils can be changed in the 3-dimensional coordinate system and the curves indicating the change of the mutual inductance value versus the transmission distance can be generated.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjinin herhangi bir aracı olmaksızın kablosuz olarak aktarılması fikri, özellikle Nikola Tesla'nın çaba harcadığı ve günümüzde yapılan sistemlere ışık tutan prensipleri kanıtladığı önemli bir çalışma konusudur. O dönemki çalışmalarda aktarılan güç miktarı, aktarım yapılabilen mesafe ve sistem verimi çok düşük değerlerle sınırlı kalmıştır. Kablosuz güç aktarım sistemlerinde kullanılan teknolojilerde yıllar içinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son olarak, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) 2007 yılında kablosuz güç aktarım sistemlerinde mesafeyi ve verimi artıran manyetik rezonans bağlı sistemi tanıtmıştır [1]. Geliştirilen bu teknoloji sayesinde güç aktarımı, büyük hava aralıklarında ve yüksek verimle gerçekleştirilebilir. Manyetik rezonans bağlı kablosuz güç aktarım yönteminin kullanıldığı çalışmalardan elde edilen sonuçlar, 1 metre hava aralığında %90 verimle ve 2 metre hava aralığında %45-50 verimle güç aktarımı yapılabileceğini göstermiştir [2, 3]. Son yıllarda kişiye özel taşınabilir elektrikli cihazların yeniden şarj edilmesinde ve gündelik hayatta kullandığımız aydınlatma cihazları, TV setleri gibi cihazların ikinci bir batarya kullanmadan doğrudan çalıştırılmasında kablosuz güç aktarım sistemi teknolojisi yoğun olarak kullanılmaktadır [4, 5].

Daha önceleri genellikle fiziksel teorilere dayalı olarak yapılan analizler elektrik mühendislerine somut sonuçlar sağlaması bakımından başarılı olamamıştır [6-7]. Aktarım yapılan alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin artırılması sistemin verimini ve güç aktarım kapasitesini düşürdüğü sezgisel olarak bilinmektedir [8, 9]. Ancak yüksek verimde enerji transferi gerçekleştirebilmek için gerekli mesafenin tam olarak belirlenmesi, anlaşılması zor bir durumdur. Enerjinin elektromanyetik dalgaların ışınımı olmadan, yüksek verimle aktarılmasına olanak sağlayan ve en bilinen yöntem, endüktif bağlı kablosuz enerji transfer sistemidir. Kablosuz enerji aktarım sistemi temel olarak transformatör prensibine dayanmaktadır. Nüve olarak havayı kullanan alıcı-verici bobinler arasında karşılıklı endüktans değeri meydana gelmektedir [9]. Endüktif bağlı sistemler üzerine yapılan çalışmalar %80 verimle bir kaç santimetrede sınırlı olan aktarım mesafesini 20-40 kHz frekans bandında 10 santimetre menzilde yapılabilmesine olanak sağlamıştır [10]. Ancak bu aralık aktarım için kullanılan bobinlerin çaplarının %30'undan daha küçük mesafelerde, endüktif bağlı sistemlerin verimli olarak kullanılabilmesine izin verir [11]. Ayrıca bobinler arasında oluşabilecek küçük hizalama hatasında kablosuz enerji aktarımı tamamen durabilir. Endüktif bağlı kablosuz enerji transfer sistemi sadece sabit ve çok yakın mesafe kullanımı için uygundur [3].

Kablosuz güç aktarım sistemlerinde karşılıklı endüktans değeri sistem verimini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdendir [12, 13]. Bobinler arasındaki mesafe ve bobinlerin hizalanması karşılıklı endüktans değerinin temel değişkenleridir [14-16]. Bu değişkenlerin karşılıklı endüktans üzerindeki etkisinin analizi ve kablosuz enerji aktarım sistemlerinin verimin artırılmasına yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle kapsamlı paket programlar kullanılarak modelleme yapılmakta ve karşılıklı endüktans değeri elde edilmektedir [17-24].

İki farklı bobin yapısı kullanılarak yapılan çalışmada bobinler arası hizalamada oluşabilecek değişimlerin, kablosuz güç aktarım sisteminin verimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak yapılan benzetim çalışmasında, bobinlerin çeşitli hizalama değerlerinde sistemin verimi gösterilmiştir [18]. Başka bir çalışmada yüksek verim elde edebilmek için bobin tasarımı yapılmış ve bu tasarımın sonuçları gerçek bir uygulamada değerlendirilmiştir. Yazarlar karşılıklı endüktans modellemesi için Ansys Maxwell yazılımını kullanmıştır [21]. Yukarıda bahsedilen çalışmalara ilaveten kablosuz güç aktarımıyla ilgili birçok çalışmada, Ansys Maxwell, PSIM, COMSOL vb. sonlu elemanlar metodu tabanlı yazılımlar, karşılıklı endüktans hesabında kullanılmıştır [25-30].

Bu çalışmada, dairesel bobinli kablosuz güç aktarım sistemi için karşılıklı endüktans değerinin, bobinler arası mesafe ve hizalamaya bağlı olarak değişiminin analiz edilebildiği bir hesaplama aracı geliştirilmiştir. Kullanıcı bu parametreleri hazırlanan ara yüz üzerinden istediği gibi belirleyerek karşılıklı endüktans değerini hesaplayabilir. Yazılımın uygulanabilirliğini gösterebilmek amacıyla belirlenen mesafe-hizalama değerleri için örnek karşılıklı ve öz endüktans değerleri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen test değerleri için elde edilen sonuçlar tablo halinde sunulmuş ve mesafe-hizalama değerleri ile karşılıklı endüktans değişimi eğrileri görselleştirilmiştir. Yazılım sayesinde kablosuz güç transferinde aktarım mesafesinin karşılıklı endüktans ve sistem verimi üzerindeki etkisi hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenebilir.

Çalışmanın geri kalan bölümlerinde sırasıyla şunlar anlatılmaktadır. İkinci bölümde kablosuz güç aktarım sistemlerinin temel çalışma prensibini açıklayabilmek amacıyla endüktif bağlı hava nüveli iki bobin, devre

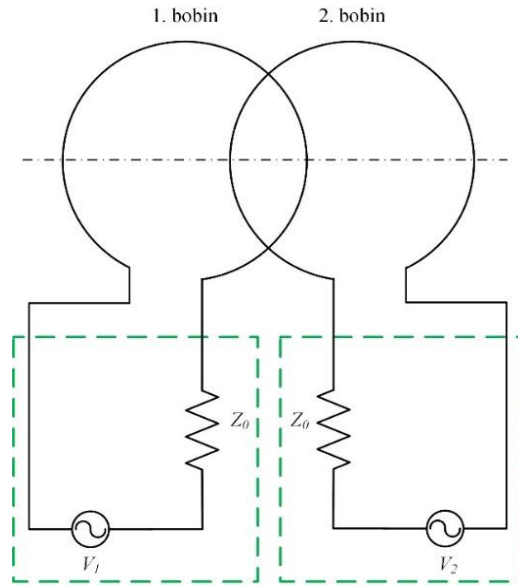
analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Karşılıklı endüktans değerinin sistem verimi üzerindeki etkisi ve gerçekleştirilen çalışmada karşılıklı endüktans hesabının analitik hesabını yapmak için kullanılan Neumann formülleri verilmiştir. Üçüncü bölümde geliştirilen karşılıklı endüktans hesaplama uygulaması tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde hava nüveli eşdeğer iki bobin için karşılıklı ve öz endüktans değerlerinin, bobinler arası mesafe ve hizalamayla değişimini gösterebilmek amacıyla geliştirilen uygulama kullanılarak bir test çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMİNİN ANALİZİ (ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEM)

Kablosuz güç aktarım sistemleri farklı yöntemler kullanılarak analiz edilse de, elektrik mühendisleri açısından en anlamlı sonuçlar düğüm denklemleri kullanılarak elde edilebilir. Güç aktarımı için kullanılan yöntem esas alındığında sistemler arasında farklılıklar bulunmasına rağmen, kablosuz güç aktarımının temel prensibi transformatör çalışmasından açıklanabilir.

2.1. Endüktif Bağlı Kablosuz Güç Aktarım Sistemi (Inductive Connected Wireless Power Transmission System)

Bu bölümde endüktif bağlı kablosuz güç aktarım sistemlerinin temel prensipleri ve karşılıklı endüktansın sistem verimi açısından önemi gösterilecektir. Bu amaçla Şekil 1’de gösterilen hava nüveli transformatör kullanılacaktır.

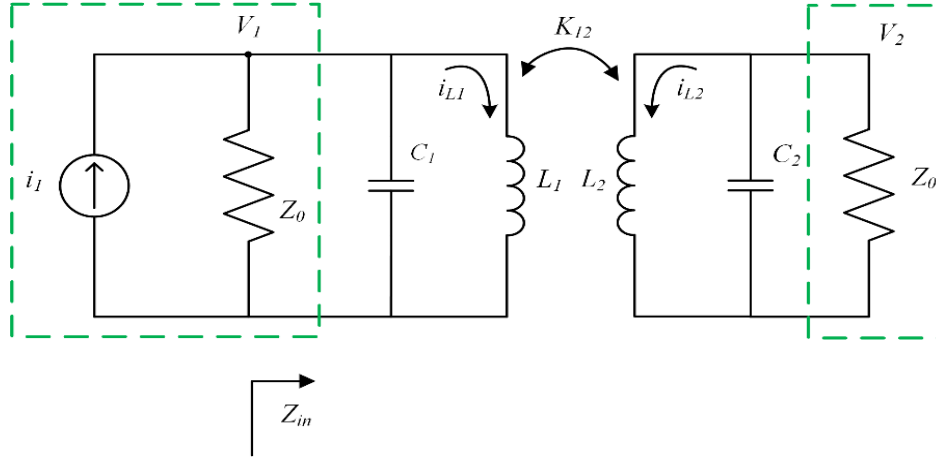


Şekil 1. Hava nüveli transformatör modeli

Hava nüveli transformatör için karşılıklı endüktans değeri M_{12} , alıcı-verici bobinlerin öz endüktansları L_1 , L_2 ve bobinler arası bağlantı katsayısı K_{12} eşitlik 1 de ifade edilmektedir.

$$K_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

Sistemin elektriksel devre modeli Şekil 2’de gösterilmiş ve bu modelde belirtilen alıcı-verici devre için akım gerilim ifadeleri eşitlikler 2-5’de verilmiştir [9].



Şekil 2. Hava nüveli transformatörün elektriksel devre modeli

$$i_1 = \frac{V_1}{Z_0} + j\omega C_1 V_1 + i_{L1} \quad (2)$$

$$V_1 = j\omega L_1 i_{L1} + j\omega M_{12} i_{L2} \quad (3)$$

$$0 = \frac{V_2}{Z_0} + j\omega C_2 V_2 + i_{L2} \quad (4)$$

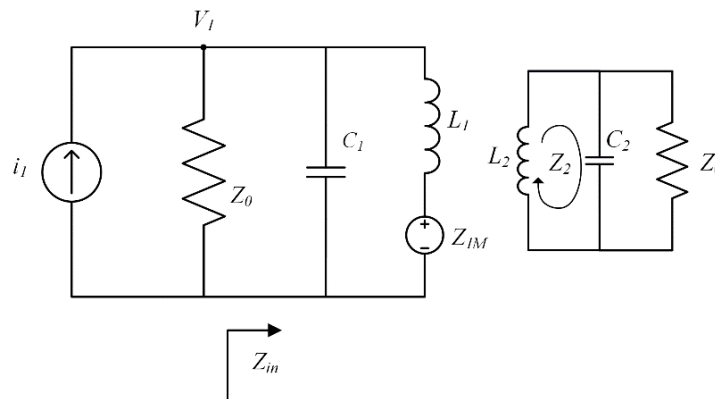
$$V_2 = j\omega L_2 i_{L2} + j\omega M_{12} i_{L1} \quad (5)$$

Her bir bobinin rezonans frekansı ω_0 ve karakteristik empedansı Z_0 ile ifade edilirse, sistemin giriş empedansı eşitlik 6'da verilen ifade ile hesaplanabilir.

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{i_1}{V_1} - \frac{1}{Z_0} = j\omega C_1 + \frac{1}{\frac{\omega^2 M_{12}^2}{\frac{1}{\frac{1}{Z_0 + j\omega C_2} + j\omega L_2} + j\omega L_1}} \quad (6)$$

Eşitlik 6'nın payda kısmında yer alan bölüm yansıyan empedans olarak isimlendirilir, manyetik bağlantı sayesinde ikinci devrede endüklenen ve V_2 ile gösterilen gerilime katkıyı temsil etmektedir. Yansıyan empedans, eşitlik 7 de gösterilen Z_{1M} ile ifade edilirse, sistemin elektriksel devre modeli Şekil 3'te verilen, karşılıklı endüktansın etkisinin yer aldığı elektrik devre modeli elde edilebilir [9].

$$Z_{1M} = \frac{1}{\frac{1}{Z_0 + j\omega C_2} + j\omega L_2} + j\omega L_1 = \frac{\omega^2 M_{12}^2}{Z_2} = \frac{\omega^2 K_{12}^2 L_1 L_2}{Z_2} \quad (7)$$



Şekil 3. Karşılıklı endüktans değerinin gösterildiği elektrik devre modeli

Özdeş iki bobinin kullanıldığı bir sistemde rezonans frekansı ve bu frekans değeri için giriş empedansı eşitlik 8 ve 9 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\omega_0^2 L_1 C_1 = \omega_0^2 L_2 C_2 = \omega_0^2 L_1 C_2 \quad (8)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega_0 C_1} // (j\omega_0 L_1 + Z_{1M}) = \frac{1}{j\omega_0 C_1} // (j\omega_0 L_1 (1 - K_{12}^2) + K_{12}^2 Z_0) \quad (9)$$

Eşitlik 9'da parazittik kapasite (C_1) değerinin düşük frekanslarda ihmal edilebileceği ve bağlantı katsayısının (K_{12}) bir olduğu kabul edilirse, giriş empedansı (Z_{in}) ile karakteristik empedans (Z_0) tam olarak eşit olacaktır. Bu sayede endüktif bağlı kablosuz güç aktarım sistemi için maksimum verim şartı sağlanmış olur. Ancak alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin artması veya bobinlerin hizalamasında oluşabilecek kaymalar sonucunda bağlantı katsayısı (K_{12}) değeri küçülür ve sonuç olarak giriş empedansı (Z_{in}) değeri ile karakteristik empedans (Z_0) değeri arasındaki eşitlik bozulur. Bu eşitliğin bozulması sistemde aktarılan gücün azalması ve veriminin düşmesi anlamına gelir. Bu sebeple endüktif bağlı kablosuz güç aktarım sistemlerinde alıcı-verici bobinler arasındaki mesafe ve hizalama değeri sistem verimi üzerinde büyük öneme sahiptir ve özenle belirlenmelidir.

2.2. Karşılıklı Endüktansın Matematiksel Analizi (Mathematical Analysis of Mutual Inductance)

Karşılıklı endüktans, paralel konumlandırılmış iki bobinin birbirlerine etkisi ile ortaya çıkan endüktanstır [12]. Dairesel bir iletkende, akı (ϕ), manyetik akı yoğunluğu (B) ve alana (A) bağlı olup bu ifade eşitlik 10'da gösterilmektedir.

$$\phi = \oint_S A ds = \int B dS \approx BA \quad (10)$$

Burada s dairesel iletken uzunluğunu, S ise iletken tarafından çevrelenen alanı temsil etmektedir. Bu noktadan hareketle, A alanına sahip içerisinden t yolundan I akımı geçen bir iletkende s yolunu kesen akı eşitlik 11 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\phi = \oint_S A ds = \oint_S \left(\oint_t \frac{\mu I dt}{4\pi r} \right) ds = \oint_S \oint_t \frac{\mu I}{4\pi r} dt ds \quad (11)$$

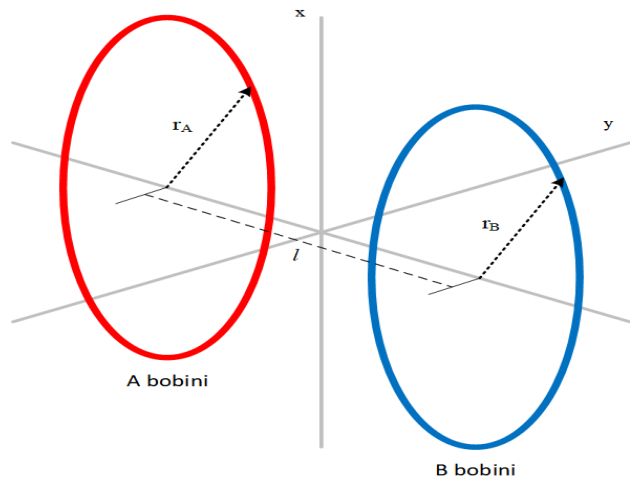
Karşılıklı endüktans ile akı arasındaki ilişki eşitlik 12'de görülebilir.

$$\phi = MI \quad (12)$$

Buradan eşitlik 13'de verilen Neumann formülü elde edilebilir [3].

$$M = \mu \oint_S \oint_t \frac{dt ds}{4\pi r} \quad (13)$$

Bu denklemde dt ve ds değeri hesaplanarak yerlerine konulduğunda iki bobin arasındaki karşılıklı endüktans değeri hesaplanabilir. Karşılıklı endüktans hesabı yapılacak A ve B olarak isimlendirilen iki bobinin yerleşimi Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Karşılıklı iki dairesel bobin yerleşimi

Bobinler arasındaki mesafe l , birinci bobinin yarıçapı r_A , ikinci bobinin yarıçapı r_B olarak tanımlanmıştır. Bobinlerin orijine uzaklıkları eşit kabul edildiğinde, her bir bobinin orijine uzaklığı $\pm l/2$ olmaktadır. A

bobini için kullanılan açı parametresi α , B bobini için kullanılan açı parametresi ise θ olarak adlandırılmıştır. Bu bobinler için ds ve dt değerleri eşitlik 14-17 kullanılarak hesaplanabilir.

$$ds = r_A(-\sin\alpha a_x + \cos\alpha a_y) d\alpha \quad (14)$$

$$dt = r_B(-\sin\theta a_x + \cos\theta a_y) d\theta \quad (15)$$

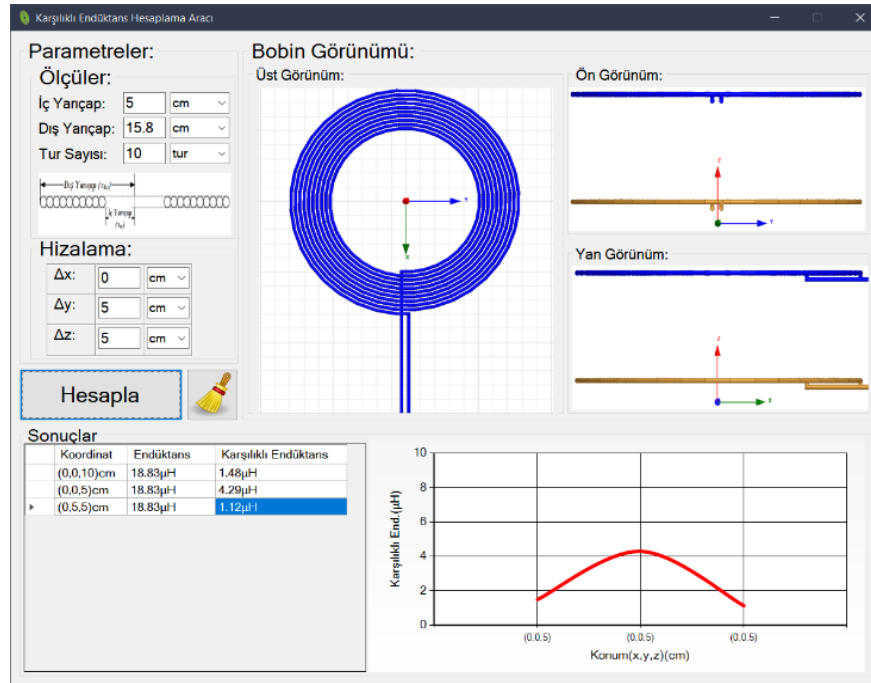
$$dsdt = r_A r_B (-\sin\alpha \sin\theta + \cos\alpha \cos\theta) d\alpha d\theta \quad (16)$$

$$dsdt = r_A r_B (\cos(\alpha - \theta)) d\alpha d\theta \quad (17)$$

Bobinlerin karşılıklı hizalanmalarında meydana gelen kaymalarda her bir bobin için oluşan yeni açı parametresi göz önüne alınarak $dsdt$ değişimi tekrar hesaplanmaktadır. Böylelikle hizalamada oluşacak kayma değerleri için karşılıklı endüktansın değişimi belirlenebilir. Bu değişime bağlı olarak Eşitlik 1'de ifade edildiği gibi kablosuz güç aktarım sistemlerinde bağlantı katsayısı K_{12} değeri ve sistem verimi değişmektedir.

3. KARŞILIKLI ENDÜKTANS HESAPLAMA ARACI (MUTUAL INDUCTANCE CALCULATION TOOL)

İkinci bölümde açıklanan matematiksel modele göre, karşılıklı endüktans hesabının yapılabildiği bir yazılım geliştirilmiştir. Uygulama Visual C# derleyici kullanılarak hazırlanmıştır. Uygulamada kullanıcı tarafından girilen bobin parametreleri kullanılarak, bobinlerin öz endüktansı (L) ve karşılıklı endüktans (M) değerleri hesaplanmaktadır. Hazırlanan hesaplama aracını tanıtabilmek amacıyla geliştirilen uygulamanın görsel ara yüzü ve bobin tasarım işlemi Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Karşılıklı endüktans uygulaması ekran görüntüsü

Uygulama 2 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci kısım kullanıcının şekil 5'de gösterilen ara yüzden ilgili menüleri kullanarak alıcı-verici bobinlerin tur sayısı (N), bobinlerin dış ($r_{dış}$) ve iç çapı ($r_{iç}$), bobinler arasındaki mesafe ve hizalama bilgilerinin belirlenmesine olanak sağlayan bölümdür. Bunlara ilaveten geliştirilen görsel ara yüzde, kullanıcının tercihleri doğrultusunda oluşturulacak bobin görselleri ve alıcı-verici bobinlerin üç boyutlu koordinat sisteminde, z-eksenine göre üstten, x-eksenine göre karşıdan ve y-eksenine göre de yandan görünüşleri yer almaktadır. Bu görseller sayesinde istenilen eksende hizalama farkının hesaplama etkisi üzerindeki etkisi incelenebilir. Kullanıcı tercih ettiği parametreleri belirledikten sonra, sayfada yer alan "Hesapla" butonu aracılığı ile bobinlere ait öz endüktansı ve bobinler arasındaki karşılıklı endüktansı hesaplamaktadır.

Yapılan hesaplama sonuçları tablo olarak ikinci bölümde sunulmaktadır. Her bir mesafe için bobinlere ait öz endüktans değerleri ve karşılıklı endüktans değeri tabloya eklenmektedir. Ayrıca elde edilen bu değerler sayfanın alt bölümünde bulunan grafiğe işlenerek karşılıklı endüktans değerinin, bobinler arası mesafeyle değişimi görselleştirilmiştir.

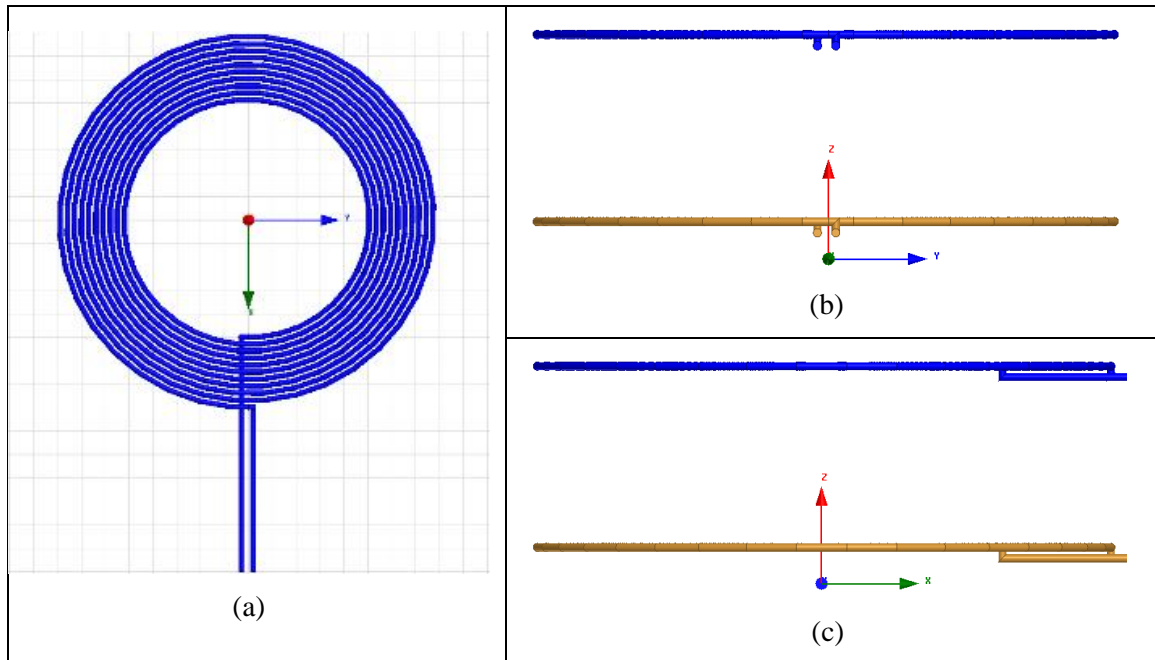
4. DEĞERLENDİRME (EVALUATION)

Bu bölümde geliştirilen hesaplama aracının etkinliğini ve kullanım kolaylığını kanıtlayabilmek amacıyla örnek alıcı-verici bobin tasarımı yapılmış ve sonuçlar verilmiştir. Hesaplama yapılacak bobinlerin tasarım özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm için belirlenen alıcı-verici bobin parametreleri

Parametre	Değeri
Tel Kesiti	4 mm ²
Tur Sayısı	10
İç Çap	10 cm
Dış Çap	15.8 cm
Radyal Değişim	0.3 cm

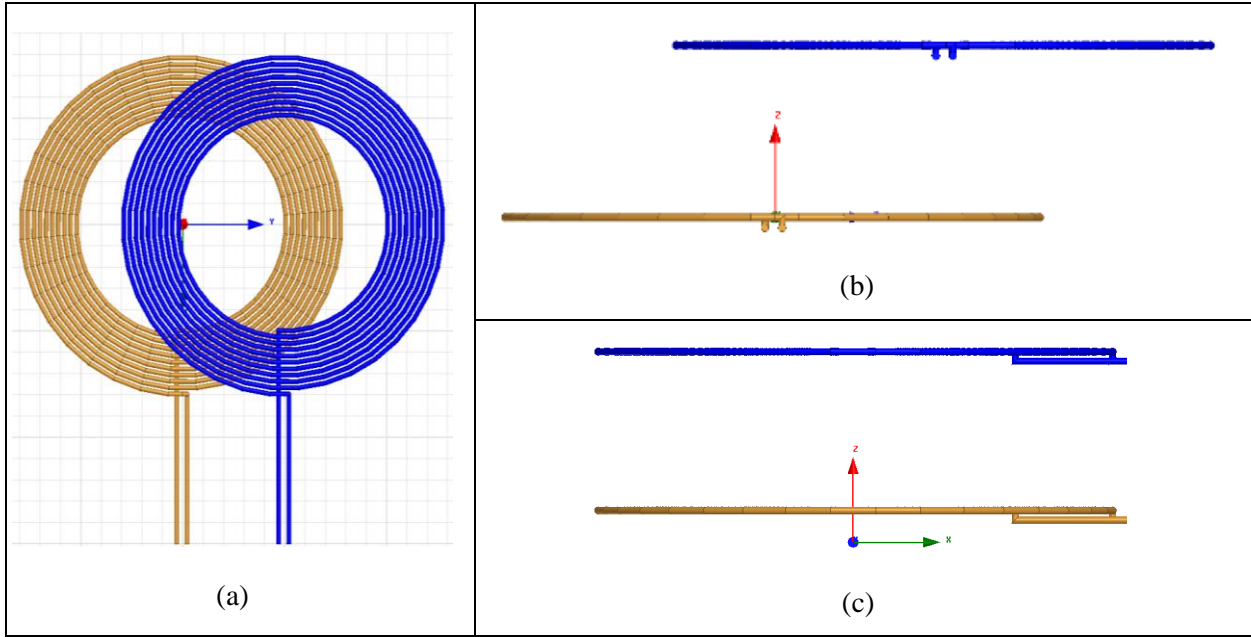
Gerçekleştirilen hesaplama aracı kullanılarak tasarlanan alıcı-verici bobinlerin x, y ve z eksenlerinde farklı yerleşim değerleri için, karşılıklı endüktans değeri belirlenmiştir. Bu amaçla ilk olarak iki bobinin merkezleri x=0, y=0 olan orijin noktasında belirlenmiş ve sadece z-ekseninde meydana gelen mesafe değişimiyle, karşılıklı endüktans değerindeki değişim ele alınmıştır. Bir başka ifadeyle, iki bobinin merkezleri tam karşılıklı ve bobinler arasındaki hizalama farkı yoktur. Sadece iki bobin arasındaki mesafe 0,1 cm aralıklarla değiştiğinde karşılıklı endüktans değeri analiz edilmiştir. Bu durumda, bobinler arasındaki mesafenin z-ekseninde her 0,1 cm artmasıyla oluşacak karşılıklı endüktans değeri, 10 cm mesafeye kadar incelenmiştir. Yapılan hesaplama için bobinlerin yerleşimini gösteren hesaplama aracına ait ekran görüntüleri Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. x ve y ekseninde sabit, z ekseninde boyunca oluşacak değişimler için bobinlerin yerleşim görüntüsü, (a) üstten, (b) karşıdan ve (c) yandan görünüm

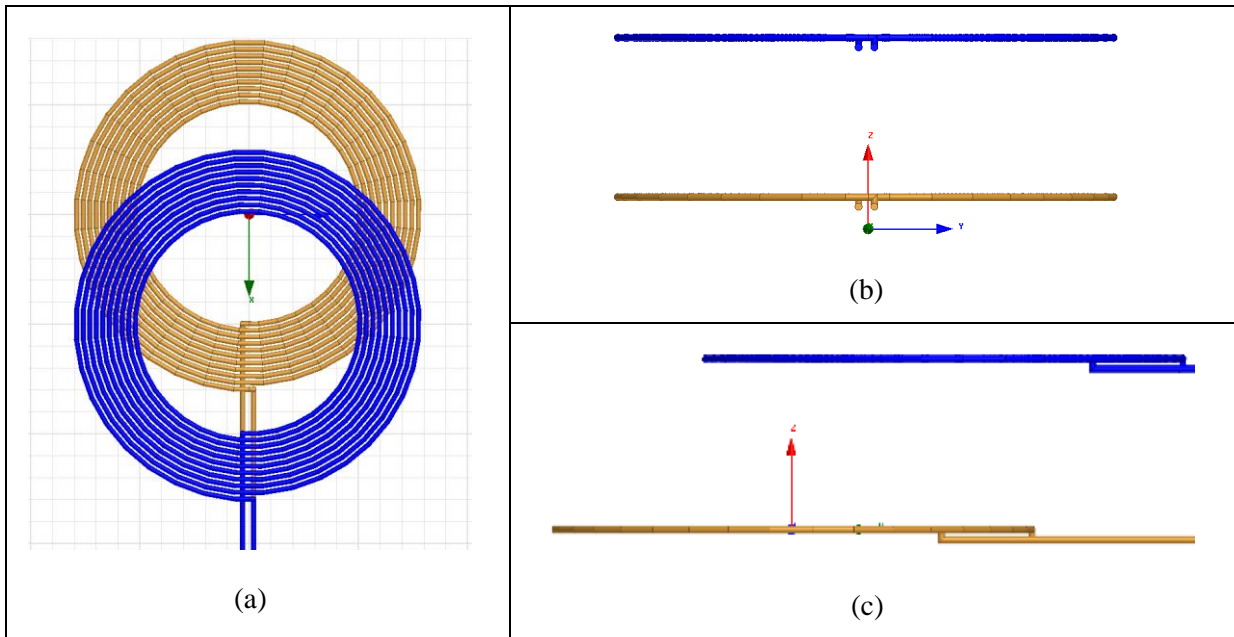
Alıcı-verici bobinler arasında hizalama farkı olmadığı durumda bobinler arasındaki mesafenin karşılıklı endüktans üzerindeki etkisi değerlendirildikten sonra, bobinler arasındaki hizalama farkı oluştuğunda mesafenin karşılıklı endüktans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla alıcı-verici bobinler x-ekseninde 0 cm ve y-ekseninde 5 cm kaydırılarak hizalama farkı oluşturulmuştur. Bobinlerin merkezleri arasındaki 5

cm kayma değeri sabit tutulmuş ve z-ekseninde 0,1 cm aralıklarla bobinler arası mesafe 10 cm'ye kadar artırılarak karşılıklı endüktans hesabı yapılmıştır. Hesaplama yapılan durum için bobinlerin üç boyutlu koordinat düzlemine yerleşimini gösteren ekran görüntüsü Şekil 7'de gösterilmiştir.



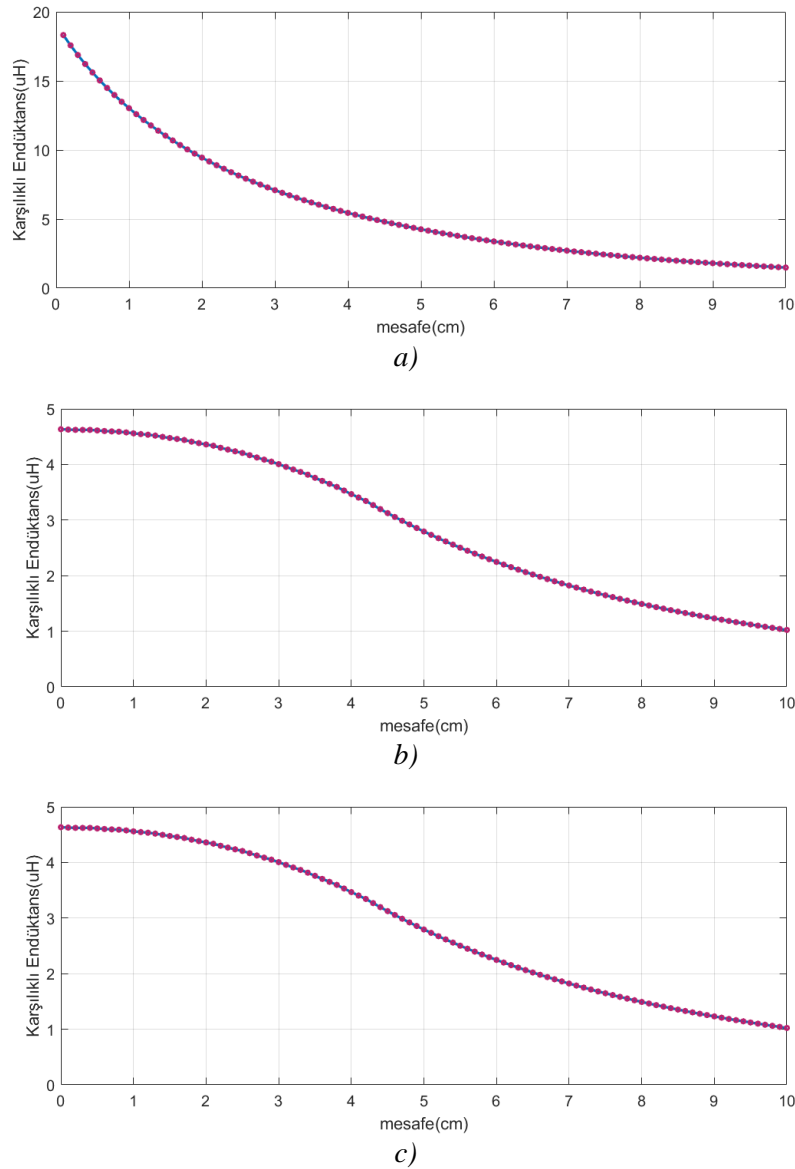
Şekil 7. x-ekseninde 0 cm ve y-ekseninde 5 cm, z-ekseni boyunca oluşacak değişimler için bobinlerin yerleşim görüntüsü, (a) üstten, (b) karşıdan ve (c) yandan görünüm

Son olarak bobinlerin merkezleri arasında oluşan hizalama farkının bir önceki duruma göre sayfa düzleminde dik olarak diğer eksen boyunca oluşması durumunda bobinler arası mesafe değişiminin karşılıklı endüktans hesabı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla alıcı-verici bobinler y-ekseninde 0 cm ve x-ekseninde 5 cm kaydırılarak hizalama farkı oluşturulmuştur. Bobinlerin merkezleri arasındaki 5 cm kayma değeri sabit tutulmuş ve z-ekseninde 0,1 cm aralıklarla bobinler arası mesafe 10 cm'ye kadar artırılarak karşılıklı endüktans hesabı yapılmıştır. Bu şartlar altında bobinlerin yerleşimini ifade eden ekran görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. x-ekseninde 5 cm ve y-ekseninde 0 cm, z-ekseni boyunca oluşacak değişimler için bobinlerin yerleşim görüntüsü, (a) üstten, (b) karşıdan ve (c) yandan görünüm

Çalışmada tasarımı gerçekleştirilen alıcı-verici bobinler için karşılıklı endüktans hesaplamalarında bobinlerin üç boyutlu koordinat düzleminde yerleşim değerleri ve bu değerler için elde edilen karşılıklı endüktans hesaplamaları Tablo 2’de, bu değerler için hesaplanan bağlantı katsayısı ve öz endüktans değerleri Tablo 3’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bobinlerin merkezleri tam simetrik iken karşılıklı endüktans değeri 0,1 cm mesafe için 18,32 μH değerinde iken bu mesafe 10 cm değerine ulaştığında karşılıklı endüktans değeri 1,48 μH değerine düşmüştür. Karşılıklı endüktansın kablosuz güç aktarım sistemlerinde verimi doğrudan etkilediği göz önüne alındığında, aktarım yapılan frekansın sabit tutulduğu durum için sistem verimi yaklaşık olarak %92 azalacaktır. Bobinlerin merkezlerinde oluşacak 5 cm hizalama farkı için bobinler arası mesafe 0,1 cm değerinde karşılıklı endüktans değeri 4,62 μH ve aynı hizalama farkında 10 cm’de karşılıklı endüktans değeri 1,02 μH olarak hesaplanmıştır. Bobinlerin simetrik ve bobinler arası mesafenin 0,1 cm olduğu duruma göre karşılıklı endüktanstaki değişim değeri, 5 cm hizalama farkı, 0,1 cm ve 10 cm mesafeler için sırasıyla %75 ve %95 oranında azalmıştır. Bu durum sabit frekansta kablosuz güç aktarımının yapıldığı bir sistemde, verimin aynı oranda düşeceğini göstermektedir. Ayrıca çalışmada tasarlanan alıcı-verici bobinler için hesaplama yapılan bütün bobin yerleşimleri için elde edilen karşılıklı endüktans değişimini gösteren grafikler Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Hesaplama aracı kullanılarak oluşturulan alıcı-verici bobinler arası karşılıklı endüktans değerinin üç farklı durum için değişimi, a) $x=0, y=0, z=0.1:0.1:10$ b) $x=0, y=5, z=0.1:0.1:10$ c) $x=5, y=0, z=0.1:0.1:10$

Tablo 2. Hesaplama sonuçları

Verici Bobin	x=0 y=0 z=0	Verici Bobin	x=0 y=0 z=0	Verici Bobin	x=0 y=0 z=0
Alıcı Bobin	x=0 y=0 z=0.1:0.1:10	Alıcı Bobin	x=0 y=5 z=0.1:0.1:10	Alıcı Bobin	x=5 y=0 z=0.1:0.1:10
Mesafe (cm)	Karşılıklı Endüktans (μH)	Mesafe (cm)	Karşılıklı Endüktans (μH)	Mesafe (cm)	Karşılıklı Endüktans (μH)
0,1	18,32201745	0,1	4,627161124	0,1	4,627161124
0,5	15,61219929	0,5	4,612340731	0,5	4,612340731
1	13,03186012	1	4,559959564	1	4,559959564
1,5	11,0357655	1,5	4,476158466	1,5	4,476158466
2	9,446660835	2	4,359308415	2	4,359308415
2,5	8,155607781	2,5	4,207217266	2,5	4,207217266
3	7,090186428	3	4,005269237	3	4,005269237
4	5,448641518	4	3,467004946	4	3,467004946
5	4,261369238	5	2,794322957	5	2,794322957
6	3,380060622	6	2,246936642	6	2,246936642
7	2,713227049	7	1,82270332	7	1,82270332
8	2,20103998	8	1,491703102	8	1,491703102
9	1,802700261	9	1,231033747	9	1,231033747
10	1,489529213	10	1,023845212	10	1,023845212

Tablo 3. Hesaplama sonuçları

Senaryo	Mesafe(cm)			$L_1=L_2$	M	K_{12}
	x	y	z			
1	0	0	5	18.83 μH	4.26 μH	0.226
	0	0	10	18.83 μH	1.48 μH	0.078
2	0	5	5	18.83 μH	2.79 μH	0.148
	0	5	10	18.83 μH	1.02 μH	0.054
3	5	0	5	18.83 μH	2.79 μH	0.148
	5	0	10	18.83 μH	1.02 μH	0.054

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kablosuz güç aktarımı için birçok metot olmasına rağmen, endüktif güç aktarımı günlük hayatta birçok tüketici uygulamasında karşımıza çıkan ve en yaygın kullanılan temassız enerji iletim uygulamasıdır. Endüktif kablosuz güç aktarım sistemlerinin en büyük sınırlaması alıcı-verici bobinler arasındaki mesafe ve bobinlerin hizalamasıdır. Bu çalışmada endüktif güç aktarım sistemlerinde mesafeyle karşılıklı endüktansın değişiminin hesaplanabilmesi amacıyla geliştirilen bir uygulama sunulmuştur. Çalışmada öncelikle hava nüveli alıcı-verici bobinler arasındaki maksimum verimin elde edilmesi için gerekli şartlar matematiksel olarak türetilmiştir. Alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin karşılıklı endüktans değeri ve dolayısıyla sistem verimi üzerindeki etkisi ifade edilmiştir. Daha sonra Neumann formülü kullanılarak geliştirilen endüktif bağlı sistemler için karşılıklı endüktans hesaplama aracı tanıtılmıştır. Uygulamanın kullanılabilirliğini kanıtlamak için hava nüveli özdeş iki bobin tasarımı uygulama arayüzü kullanılarak kolaylıkla tasarlanmıştır. Bobinlerin birlerine göre yerleşimi üç boyutlu koordinat sisteminde belirlenmiş ve her bir pozisyon için karşılıklı endüktans değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen görsel ara yüz kullanıcılara bobinlerin birlerine göre konumunu üç boyutlu koordinat sisteminde gözlemlene imkânı vermektedir. Ayrıca bobinlerin koordinat düzleminde yer değişimiyle, karşılıklı endüktansın değişim eğrisi oluşturulmuştur. Bobinler arasında aktarım verimini etkileyen diğer önemli parametre olan bobinlerin öz endüktans değerleri hesaplanmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda karşılıklı endüktans değerini etkileyen, tasarlanacak bobinler için iletken kesiti ve bobin yapısının seçimi uygulamaya ilave edilmesi ve geliştirilen uygulamanın doğrudan kablosuz güç aktarım sistemleri için kullanılabilir hale getirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [2] A. Karalis, J.D. Joannopoulos, M Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics* 323 (2008) 34–48.
- [3] T. Imura, Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, October 2011, pp-4746-4752.
- [4] J. Yungtaek and M. M. Jovanovic, "A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 520–527, Jun. 2003.
- [5] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase, and T. Satoh, "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3329–3331, Sep. 2002.
- [6] S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency," *Phys. Today*, vol. 50, no. 7, pp. 36–42, Jul. 1997.
- [7] A. Kurs, R. Moffatt, and M. Soljacic, "Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 4, p. 044 102-1-3, 2010.
- [8] E. Waffenschmidt and T. Staring, "Limitation of inductive power transfer for consumer application," in *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Sep. 2009, pp. 1–10.
- [9] S. Cheon, Y.-H. Kim, S-Y Kang, M. L. Lee, J.-M. Lee, and T. Zyung, "Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, July 2011, pp. 2906-2914.
- [10] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, Member, IEEE, and Y. Hori, "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, September 2013, pp. 3689-3698.
- [11] 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, May 2009.
- [12] I. Villar, U. Iruretagoyena, A. Rujas, A. GarciaBediaga, and I. P. d. Arenaza, "Design and implementation of a SiC based contactless battery charger for electric vehicles," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 1294-1300.
- [13] T. Fujita, T. Yasuda, and H. Akagi, "A moving wireless power transfer system applicable to a stationary system," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 4943-4950.
- [14] 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.
- [15] M. Ibrahim, L. Pichon, L. Bernard, A. Razek, J. Houivet, and O. Cayol, "Advanced Modeling of a 2-kW Series-Series Resonating Inductive Charger for Real Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 421-430, 2015.
- [16] N. Liu and T. G. Habetler, "Design of a Universal Inductive Charger for Multiple Electric Vehicle Models," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6378-6390, 2015.
- [17] S. Wang, D. G. Dorrell, Y. Guo, and M.-F. Hsieh, "Inductive Charging Coupler With Assistive Coils," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, 2016.
- [18] W. Zhang, J. C. White, A. M. Abraham, and C. C. Mi, "Loosely Coupled Transformer Structure and Interoperability Study for EV Wireless Charging Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6356-6367, 2015.

- [19] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson, and B. Koushki, "Effects of parallel load-side compensation in wireless power transfer," 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015, pp. 369-374.
- [20] R. A. Deshmukh and D. B. Talange, "Design of 1kW inductive power transfer system for electric vehicle," 2015 International Conference on Advancements in Power and Energy (TAP Energy), 2015, pp. 93-97.
- [21] H. Kim, "Coil Design and Measurements of Automotive Magnetic Resonant Wireless Charging System for High-Efficiency and Low Magnetic Field Leakage," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp. 1-18, 2016.
- [22] H. Kim, C. Song, D. H. Kim, and J. Kim, "Design of conductive shield for wireless power transfer system for electric vehicle considering automotive body," 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, pp. 1369-1374.
- [23] G. Rezmerita, L. Bobaru, M. Stanculescu, M. Iordache, and D. Niculae, "A self and mutual inductance calculation resonators with finite element analysis," 7th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017, 2017: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [24] T. Yilmaz, N. Hasan, R. Zane, and Z. Pantic, "Multi-Objective Optimization of Circular Magnetic Couplers for Wireless Power Transfer Applications," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 8, 2017, Art. no. 7894196.
- [25] E. Gati, G. Kampitsis, and S. Manias, "Variable Frequency Controller for Inductive Power Transfer in Dynamic Conditions," IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 1-1, 2016.
- [26] Y. Tang, F. Zhu, Y. Wang, and H. Ma, "Design and optimizations of solenoid magnetic structure for inductive power transfer in EV applications," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2015, 2015, pp. 001459-001464.
- [27] S. Wang and D. G. Dorrell, "Copper Loss Analysis of EV Charging Coupler," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [28] 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.
- [29] G. Xu, X. Yang, Q. Yang, J. Zhao, and Y. Li, "Design on Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission and Monitoring System for Implanted Devices," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, 2016.
- [30] F. P. Wijaya and K. Kondo, "Charging power limitation method of a wireless power transmission system for railway vehicle," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2015, 2015, pp. 003525-003530.



Nötr Kenetlemeli Eviriciler için Çok Giriş – Çok Çıkışlı DA-DA Çevirici Tasarımı ve Kontrolü

Naki GÜLER^{1,*} Erdal IRMAK²

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 06374, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada, Nötr Kenetlemeli Eviricilerin (NKE) hem çok girişli yapıya getirilmesi hem de gerilim dengesizliğinin giderilmesi için çok-giriş çok-çıkışlı bir DA-DA çevirici topolojisi sunulmuştur. Çok kaynaklı çalışma, önerilen çevirici modelinin çok girişli özelliği ile sağlanmıştır. Nötr kenetlemeli eviricilerde bozunumların artmasına sebep olan dengesiz kondansatör gerilimleri, bu topolojinin çok çıkışlı özelliğiyle DA tarafta dengelenmiştir. Şebeke etkileşimli eviricinin kondansatör gerilimlerinin dengelenmesi ve güç akışını kontrol etmek için PI denetleyiciler kullanılmıştır. Önerilen topolojinin teorik altyapısını ve performansını doğrulamak için Matlab/Simulink platformunda benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, iki giriş kaynağında üretilen enerjinin, NKE ve önerilen çevirici modeli aracılığıyla başarılı bir şekilde şebekeye aktarıldığını göstermiştir. NKE kondansatör gerilimlerinin eşitliğini bozsa da, gerilim dengelenmesi kontrolörler ve önerilen dönüştürücü modeli tarafından sağlanmıştır. Dengeli ve dengesiz koşullar altında elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin bozunumları önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 29/11/2018

Düzeltilme: 12/12/2018

Kabul: 21/12/2018

Anahtar Kelimeler

Çok Giriş – Çok Çıkışlı
 DA-DA Çevirici
 Nötr Kenetlemeli Evirici
 Gerilim kontrolü

Keywords

Multi Input – Multi Output
 DC-DC Converter
 Neutral Point Clamped
 Inverter
 Voltage Control

Design and Control of Multi – Input Multi – Output DC-DC Converter for Neutral Point Clamped Inverters

Abstract

In this study, multi-input multi-output DC/DC converter topology is presented for both multi-source operation and voltage unbalancing of Neutral Point Clamped (NPC) inverters. Multi-source operation is provided with multi-input feature of proposed converter model. The unbalanced capacitor voltages in NPC inverter leading to increase the harmonics are compensated on the DC side by the multi-output feature of this topology. PI controllers are utilized to control the capacitor voltages and power flow of grid connected inverter. Simulation studies are performed in Matlab/Simulink platform to verify the theoretical background and performance of the proposed topology. Simulation results show that, produced power from two input sources is successfully transferred to grid through the proposed converter structure and NPC inverter. Even if NPC inverter disturbs the equality of capacitor voltages, the voltage balance is maintained by the controllers and proposed converter model. The results that are obtained under balanced and unbalanced conditions show that, the proposed system considerably decreases the harmonics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile farklı türde üreteçlerin birlikte çalışabilirliği önem kazanmıştır. Aşağıda verilen güncel literatür özetinden görüldüğü üzere, birden çok kaynağın birlikte çalışabilmesi için çok girişli güç çevirici tasarımları yapılmaktadır. Bu kaynaklarda üretilen enerjinin şebekeye transferinde kullanılan eviricilerin tasarımı ve kontrolü son yıllarda çalışılan konular arasında yer almaktadır. Bunların yanı sıra, enerji kalitesi kavramı da tüm sistemler için önem kazanmıştır[1]. Enerji kalitesinin klasik topolojilere göre iyi olması çok seviyeli eviricileri ön plana çıkarmıştır. Nötr kenetlemeli eviricilerin, klasik evirici yapılarına göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük anahtarlama frekanslarında dahi düşük bozunuma sahip güç akışı sağlanabilmesi.

- Anahtarlar üzerindeki gerilim stresinin az olması.
- Anahtarlama kayıplarının az olması.
- Düşük boyutlu filtreler kullanması.

Nötr kenetlemeli eviriciler, diğer çok seviyeli evirici topolojilerine göre (kaskat H-köprü ve uçan kondansatörlü) yüksek gerilim seviyesinde çalışabilme ve özel devre elemanına ihtiyaç duymama gibi avantajlara sahiptir. Yaygın olarak kullanılan bu topoloji üzerine literatürde geliştirme çalışmaları yapılarak model üzerindeki problemlerin giderilmesi hedeflenmiştir. Diyot kenetlemeli evirici modelinde, faz kollarındaki diyotlardan geçen kontrolsüz akımlar ve her anahtar üzerinden geçen tam güç akımları kayıpları artırmaktadır. Diyotların kaldırılması ve ana koldaki anahtar sayısının azaltılması için T-NKE (T baralı Nötr Kenetlemeli Evirici) topolojisi geliştirilmiştir[2]. T-NKE modelinde ise anahtarların blok diyotlarından geçen yüksek akımlar özel yapılara ihtiyaç duyulmasına sebep olmuştur. Bu olumsuz durumun giderilmesi için T barasındaki anahtarlama elemanlarının blok diyotları kaldırılarak GT-NKE (Gelişmiş T tipi NKE) topolojisi oluşturulmuştur[3]. NKE yapısı üzerinde iyileştirme çalışmaları ile birçok olumsuz durum giderilse de tek kaynaklı çalışması ve giriş kondansatörlerinde meydana gelen gerilim dengesizliği problemi hala birer dezavantaj oluşturmaktadır.

Özellikle yüksek güçlü uygulamalar için birden çok eviricinin paralel bağlanması ile çok kaynaklı çalışabilirlik sağlanırken[4], orta ve düşük güçlü uygulamalarda, giriş kaynakları çeviriciler aracılığıyla ortak bir DA baraya bağlanmaktadır. Böylece, hem kaynaklar arasındaki güç paylaşımı hem de DA bara gerilimlerinin kontrolü bu çeviriciler ile sağlanmaktadır[5-7]. Aynı çeviriciler kullanılan bu sistemlerin yanı sıra, birden çok girişe sahip çeviriciler de son yıllarda yaygın çalışılan konular arasında yer almaktadır[8, 9]. Bu topolojilerde klasik yapılar üzerinde düzenlemeler yapılarak bağımsız giriş kaynaklarından güç akışı sağlanmaktadır. Çok girişli yapıların yanı sıra, çok çıkışlı çevirici topolojileri de sabit çıkış gerilimi veya farklı gerilim seviyesine sahip yüklerin beslenmesinde kullanılmaktadır[10-13]. Çok giriş – çok çıkışlı DA-DA çeviriciler ise her iki özelliği de birlikte barındırır. Bu yapılarda, güç akışının ve çıkış gerilimlerinin birbirinden bağımsız olarak yönetilmesi temel unsurlardır. Çok giriş – çok çıkışlı topolojilerde tek bobin kullanımı ile maliyet ve boyut azaltılabilirken, bu durum çıkış tarafındaki gerilim kazancını sınırlamaktadır[14,15]. Bu nedenle, yüksek gerilim kazancı istenilen uygulamalarda her kaynak için ayrı bir bobin kullanılmaktadır. Ayrıca, tek bobin kullanımı düşük güçlü uygulamalarda sorun oluşturmazken, orta ve yüksek güçlü yapılarda giriş kaynağından dengesiz akımlar çekilmesine neden olmaktadır. Bağımsız bobin kullanımı bu açıdan avantaj sağlamaktadır. Kontrol işlemleri açısından karşılaştırıldığında da güç katmanlarını ayrı ayrı yönetmek, karmaşık kontrol yapısı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır[16]. Üreteçlerin entegrasyonu hakkında sunulan literatür özeti doğrultusunda, çok girişli bir DA-DA yapı ile enerji kaynaklarında üretilen gücün sabit gerilime sahip ortak bir DA barada birleştirilebileceği söylenebilir.

Sabit bir DA bara gerilimi olmasına rağmen, NKE çıkışındaki dengesiz yüklenmeden kaynaklanan nötr akımı, giriş kondansatörleri arasındaki gerilim dengesini bozmaktadır. Bu durum alternanslar arasında gerilim farkı yaratmakta ve buna bağlı olarak bozunumları artırmaktadır[17]. Ayrıca, gerilim dengesizliğinden kaynaklı pozitif ya da negatif taraftaki kondansatör geriliminin artması, anahtarlar üzerindeki gerilim stresini de artırmaktadır. Bu olumsuz etkilerin giderilmesi son yılların yaygın çalışılan konuları arasında yer almıştır. Yapılan çalışmalarda, herhangi bir güç anahtarına ihtiyaç duymaksızın sadece güç kontrol algoritmasına kondansatör davranışlarının eklenmesi ile gerilim dengesi sağlanmıştır[18-21]. [10]'de ise diğer çalışmalardan farklı olarak DA girişte gerilim dengesizliğinin giderilmesi incelenmiştir. Bunun için, tek giriş - iki çıkışlı bir yükselten çevirici giriş kondansatörlerine bağlanarak her katmanın çıkışı bağımsız olarak kontrol edilmiştir. Fakat bu modelin tek girişe sahip olması sebebiyle NKE çok kaynaklı çalışmamaktadır. Aynı zamanda [10]'daki modelde, 4 adet ek anahtar kullanılması, hem kontrol işlemlerini zorlaştırmış hem de toplam sistem maliyetini artırmıştır.

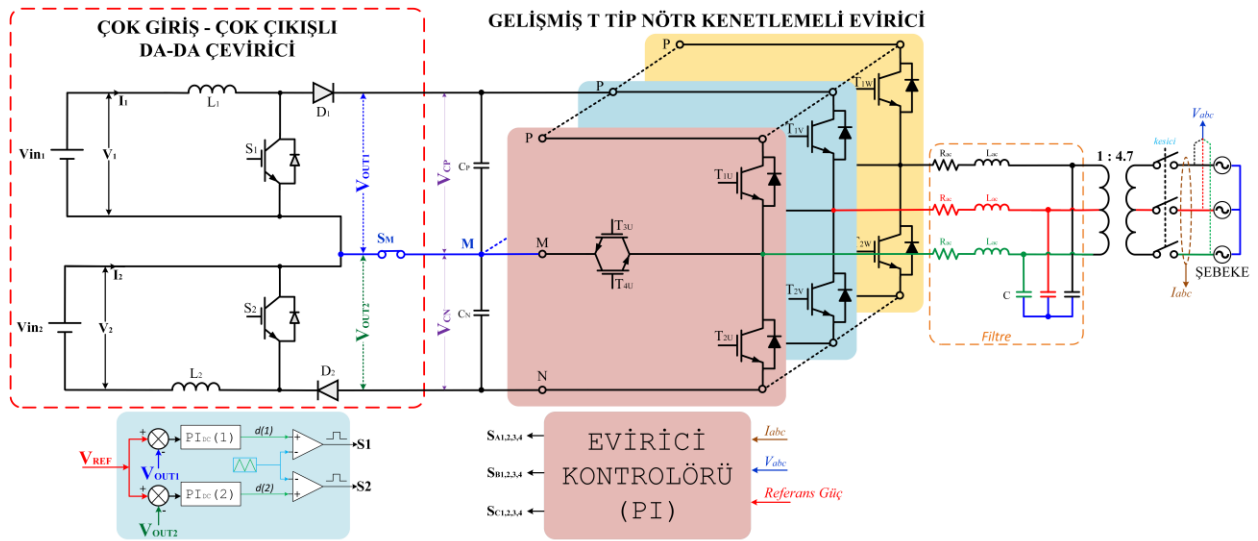
Bu çalışmada önerilen model ile nötr kenetlemeli evirici hem çok girişli hale getirilmiş hem de gerilim dengelenmesi DA tarafta sağlanmıştır. Birbirinden bağımsız giriş kaynaklarında üretilen gerilimler iki giriş – iki çıkışa sahip çevirici modeli ile yükseltilerek çıkışlara aktarılmıştır. Bu çıkışlar, NKE girişindeki kondansatörlere bağlanarak kaynaklardan eviriciye güç akışı sağlanmıştır. Böylece, paralel evirici topolojilerine göre daha basit bir güç yapısı ile eviricinin çok kaynaklı çalışabilirliği sağlanmıştır. Önerilen modelin en önemli unsuru ise bağımsız kontrol edilebilen çıkışlara sahip olmasıdır. Böylece, nötr

kenetlemeli evirici girişindeki gerilim dengesizliği problemi DA tarafta giderilmiştir. Bu durum, gerilim dengelenmesi için kullanılan karmaşık kontrol yapısı ihtiyacını ortadan kaldırmıştır.

2. SİSTEM TASARIMI (DESIGN OF THE SYSTEM)

Önerilen sistem, üç fazlı üç seviyeli nötr kenetlemeli eviricinin çok girişli çalışmaya uygun hale getirilmesi ve nötr noktası gerilim dengesizliğinin DA tarafta giderilmesi için tasarlanmıştır. Bu amaçla, çok giriş – çok çıkışlı DA-DA çevirici modeli oluşturulmuştur. İki girişe sahip sistem modeli Şekil 1’de verilmiştir. Giriş olarak kullanılan (V_{in1} ve V_{in2}) kaynakların farklı gerilim seviyesinde olma durumları göz önünde bulundurularak iki ayrı yükselten çevirici katmanı kullanılmıştır. Aynı zamanda, nötr noktası gerilim dengesinin sağlanması da bağımsız çalışan bu iki katman sayesinde gerçekleştirilmiştir. Çıktıların bağımsız olarak kontrol edilebilmesi için her katmanda ayrı anahtar ve bobin kullanılmıştır. Katmanların çıkışındaki kondansatör gerilimleri ile referans değer arasındaki farklar ayrı PI ($PI_{DC(1)}$ ve $PI_{DC(2)}$) denetleyicilere girilmiştir. Anahtarlama sinyallerinin doluluk oranları ($d(1)$ ve $d(2)$) PI kontrolörler tarafından üretilerek bir taşıyıcı sinyal (üçgen dalga) ile karşılaştırılmıştır. Böylece, gerilim kontrolü için gerekli anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Bağımsız olarak güç ve gerilim kontrolü yapılan çevirici çıkışları, NKE girişindeki kondansatörlere bağlanarak çevirici – evirici etkileşimi sağlanmıştır.

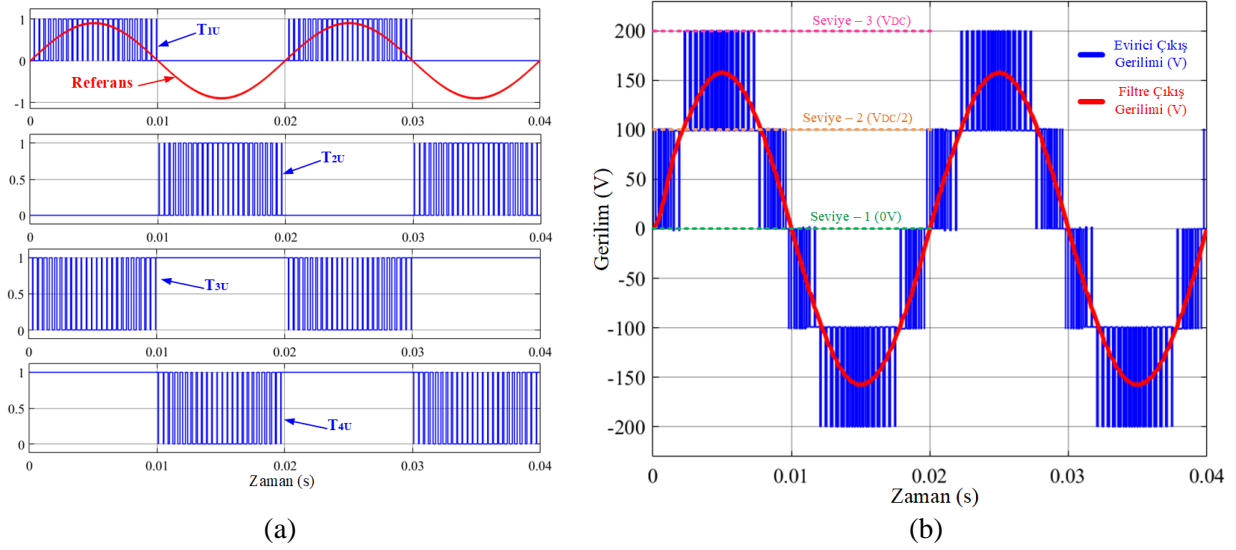
DA tarafta üretilen gücün şebekeye aktarılması için kullanılan GT-NKE modeli Şekil 1’de görülmektedir. 3 seviyeli NKE topolojileri bir faz sinyalini üretmek için 4 adet anahtar kullanmaktadır. Bir faz için oluşturulan kol, faz sayısına göre çoğaltılarak 3 fazlı yapı oluşturulmaktadır. GT-NKE tip evirici, her kolundaki nötr noktasına (M) bağlı iki anahtar (T_3 ve T_4) sayesinde 3’üncü bir seviye oluşturmaktadır.



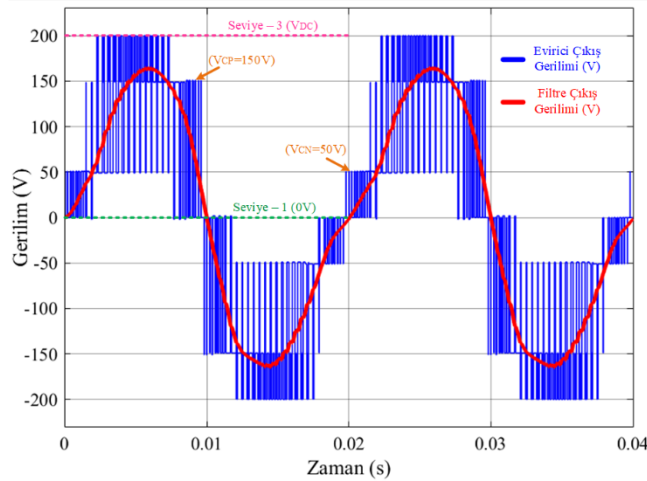
Şekil 1. Sistemin blok diyagramı

Şekil 2(a)’da verilen anahtarlama sinyallerinden görüldüğü üzere, bir alternansın oluşturulması için aynı anda iki anahtar iletimde olmaktadır. Tüm anahtarlar, pozitif ve negatif bara arasında anahtarlama yapmak yerine, pozitif (P) – nötr noktası (M) veya negatif (N) – nötr noktası arasında anahtarlama yapmaktadır. Böylece, Şekil 2(b)’de verilen Seviye - 2’nin oluşması sağlanmaktadır. Üçüncü bir seviyenin oluşmasını sağlayan bu durumun diğer avantajı ise, anahtarlar üzerindeki gerilim stresini klasik evirici topolojisine göre yarıya düşürmesidir.

Nötr kenetlemeli eviricilerin ideal çalışması giriş kondansatörleri üzerindeki gerilimlerin (V_{CP} ve V_{CN}) eşit olduğu durumda gerçekleşmektedir. Anahtarlama sinyalleri de bu dengeli durum için üretilmektedir. Ancak, dengesiz yüklenmeden ve filtrelerden kaynaklı sıfır bileşen akımı oluştuğunda, giriş kondansatörlerindeki gerilim eşitliği bozulmaktadır. Bu durumun incelenmesi için örnek bir sonuç Şekil 3’te verilmiştir. Kondansatör gerilimlerinin eşit olmaması, Seviye-2’nin gerilim değerini değiştirmekte ve simetrik olmayan 4’üncü bir seviye oluşturmaktadır. Bu durum, nötr noktası gerilim dengesizliği olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2. a: Anahtarlama sinyalleri, b: Dengeli nötr barası durumunda evirici çıkış gerilimi



Şekil 3. Dengesiz nötr noktası durumunda evirici çıkış gerilimi

Şekil 3'te görüldüğü üzere, simetrik olmayan artışlar nedeni ile evirici gerilimi üzerinde bozucu etkiler oluşmakta ve şebekeye yüksek bozunuma sahip güç aktarılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, kondansatör geriliminin dengelenmesi NKE'ler için önemli bir unsurdur. Kondansatör gerilimlerinin eşitlenmesinin yanı sıra, uygun kapasitede kondansatör seçimi de NKE'ler için önemlidir. Çünkü, bu kondansatörler hem nötr noktasını oluşturmak hem de giriş gerilimini filtre etmek için kullanılmaktadır. DA bara gerilimindeki salınım miktarını kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutmak için gerekli kapasite Denklem 1 ile hesaplanmaktadır[22,23]. DA baradaki salınım miktarı kondansatörlerden çekilen güç değeri ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Stabil bir DA bara gerilimi elde etmek için çok yüksek kapasiteli kondansatörler kullanılabilir. Fakat bu durum filtre boyutunu ve maliyeti artırmaktadır. Temel olarak, salınım miktarı bozunumları önemli oranda etkilemiyorsa geçerli kapasite uygulanabilirlik açısından yeterli kabul edilebilir. Bu çalışmada kabul edilebilir salınım oranı ($\%salınım$) $\%20$ olarak seçilmiştir. Şebekeye senkron olarak 50Hz frekansta çalışan 3 fazlı evirici, bir periyot boyunca 6 alternans oluşturmaktadır. Bu nedenle salınım frekansı, şebeke frekansının 6 katıdır. Verilen açıklamalar doğrultusunda, 200V toplam DA bara gerilimi ve $\%20$ salınım oranı için toplam kapasite Denklem 1'den $2083\mu F$ olarak hesaplanmıştır. Nötr kenetlemeli eviricilerde pozitif ve negatif olmak üzere iki giriş noktası bulunduğu için her girişe toplam kapasitenin yarısı değerinde kondansatörler bağlanmaktadır[22,23]. Bu nedenle pozitif ve negatif katmana $1000\mu F$ değerinde kondansatörler bağlanmıştır.

$$C_{DA} = \frac{P}{(V_{CP}+V_{CN})^2(\%salınım)6f_s} \quad 1$$

Burada;

C_{DA} : DA bara kondansatör kapasitesi

P : Evirici nominal gücü (2.5kW)

V_{CP} : Pozitif baraya bağlı kondansatör gerilimi (100V)

V_{CN} : Negatif baraya bağlı kondansatör gerilimi (100V)

f_s : Şebeke frekansı (50Hz)

DA bara kondansatörlerinin belirlenmesinin yanı sıra, çıkış filtreleri de enerji kalitesi bakımından büyük öneme sahiptir. Evirici çıkışında elde edilen çok seviyeli gerilim sinyallerinin sinüzoidal biçime getirilmesi için LC filtre kullanılmıştır. LC filtre parametreleri [24]'te detayları verildiği gibi, sistem tasarımına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Filtre endüktansının minimum değeri Denklem 2 ile hesaplanabilir. Evirici çıkışında transformatör olduğundan filtre gerilimi Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$L_{ac} \geq \frac{5\sqrt{2}(V_{CP}+V_{CN})T_{sw}V_{ac}}{2P} \quad 2$$

$$V_{ac} = 380/4.7 = 80.85V \quad 3$$

Burada;

L_{ac} : Filtre endüktansı

T_{sw} : Anahtarlama frekansının periyot süresi (400µs)

V_{ac} : Evirici çıkış gerilimi (Transformatör öncesi)

Denklem 2 kullanılarak minimum filtre endüktansı 9.15mH bulunmuştur. Bu değerden büyük bir filtre seçilmesi enerji kalitesi açısından önemlidir. Fakat çıkışa seri bağlı bu bobin üzerindeki gerilim düşümü filtre boyutuna bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle maksimum filtre endüktansı Denklem 4 ile hesaplanmaktadır[24].

$$L_{ac} \leq \frac{\sqrt{(V_{CP}+V_{CN})-4(V_{ac})^2}}{2\sqrt{2}I_{ac}\omega_s} \quad 4$$

Burada;

I_{ac} : Evirici çıkış akımı (9A)

ω_s : Şebeke açısal frekansı (314rad/s)

Gerilim düşümü ve enerji kalitesi göz önünde bulundurularak akım değeri nominal gücün yarısı için 9A olarak hesaplanmıştır. Denklem 2 ve Denklem 4'ten elde edilen değerler göz önünde bulundurularak filtre endüktansı 15mH olarak seçilmiştir. Genellikle filtre kondansatörü hesaplanırken reaktif güç, nominal güç değerinin %5'ini aşmayacak şekilde seçilmektedir[24]. Kondansatör kapasitesinin maksimum değeri Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$C \leq \frac{5}{100} \times \frac{P}{6\pi f_s V_{ac}^2} \quad 5$$

Burada;

C : Filtre kondansatörünün kapasitesi

Denklem 5 kullanılarak maksimum kapasite 20µF olarak hesaplanmıştır. Filtre kondansatörü güç katsayısının azalmasına sebep olduğundan belirlenen değer simülasyon çalışmalarında test edilerek, 10µF filtre kapasitesinin enerji kalitesi ve reaktif güç üzerinde meydana gelen salınımlar açısından yeterli olduğu görülmüştür.

2.1. Şebeke Etkileşimi Eviricinin Güç Kontrolü (Power Control of Grid Connected Inverter)

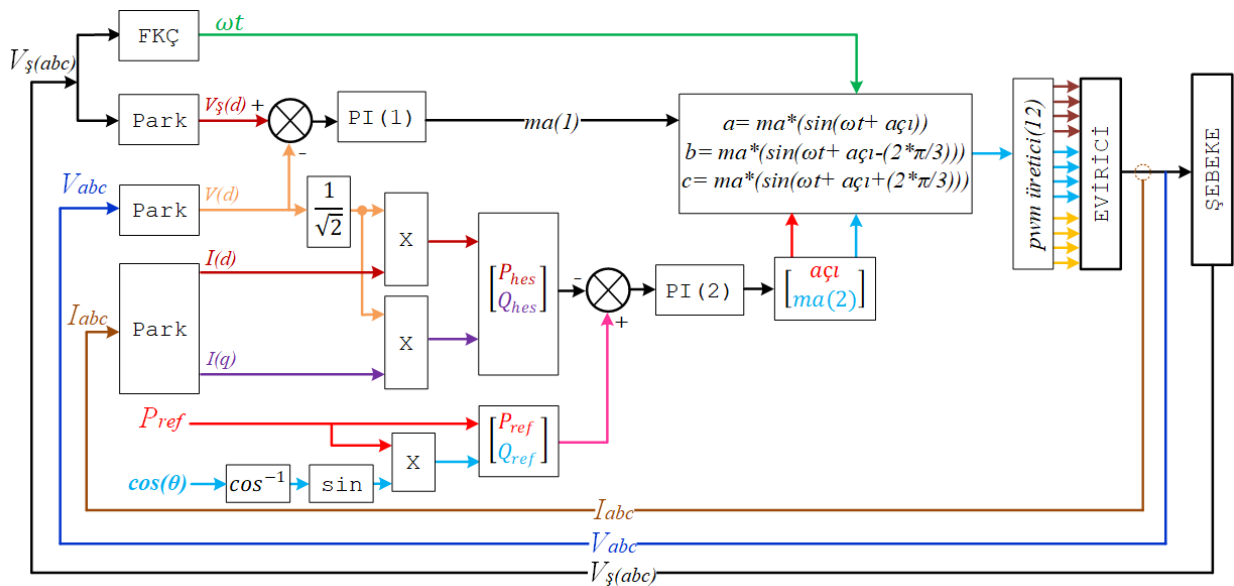
Enterkonnekte şebekelere bağlı tüm üreteçlerde olduğu gibi eviricilerde de paralel bağlantı öncesi ve sonrası durumların kontrol edilmesi gerekmektedir. Herhangi bir üreticinin şebekeye güvenli bir biçimde bağlanması için, gerilim genliğinin, faz açısının ve frekansının şebeke ile örtüşmesi gerekmektedir. Bu nedenle, kontrol işlemleri bağlantı öncesi ve sonrası için ayrı ayrı incelenmiştir. Şebeke faz açısı ve frekansının belirlenmesinde faz kilitlemeli çevrim (FKÇ) en yaygın kullanılan yöntemdir. FKÇ, girişine uygulanan sinyalin açısal hız (ωt) bilgisini üretmektedir. Açısal hız sinüs fonksiyonuna tabi tutularak evirici kontrolü için gerekli referans sinyaller üretilmektedir. Bu sayede, evirici hem şebeke faz açısında hem de şebeke frekansında çalışmaktadır.

Paralel bağlantı öncesi için diğer şart olan gerilim genliğinin eşitlenmesi için şebeke gerilimi ($V_{\phi(abc)}$) ölçülerek Şekil 4'teki gibi evirici çıkış gerilimi (V_{abc}) ile farkı hesaplanmıştır. Etkin değer fonksiyonunun hesaplama süresi daha uzun zaman aldığından, Park dönüşümleri sayesinde gerilimlerin tepe değerleri ($V_{\phi(d)}$ ve $V_{(d)}$) elde edilmiştir. Fark alma işlemi sonucunda elde edilen hata sinyali, şebeke bağlantısı öncesinde evirici çıkış gerilimini kontrol eden $PI(1)$ denetleyicisine girilmiştir. PI denetleyici hata sinyaline göre modülasyon indeksini ($ma(1)$) değiştirerek evirici çıkış geriliminin şebeke gerilimine eşitlenmesini sağlamaktadır. Tablo 1'de verilen PI parametreleri, Ziegler-Nichols açık döngü yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. PI Parametreleri

	k_p	k_i
$PI(1)$	0.01	0.5
$PI(2)$	1	100
$PI_{DC}(1)$ ve $PI_{DC}(2)$	0.0008	0.6

Gerilim ve faz açısının eşitlenmesinden sonra evirici-şebeke bağlantısı sağlanmaktadır. Bu süreçten itibaren Şekil 4'teki $ma(2)$ ve $aç\i$ bilgisi ile güç akışı kontrol edilmektedir. Şebekeden eviriciye doğru ters güç akışının engellenmesi ve kontrollere doğru bir şekilde sağlanması için aktif ve reaktif bileşenlerin eş zamanlı olarak denetlenmesi gerekmektedir. Güç bileşenlerinin ayrı ayrı hesaplanması için evirici çıkış akımı (I_{abc}), Park dönüşümüne tabi tutularak d ve q bileşenleri elde edilmiştir. Bu iki değer evirici çıkışındaki gerilimin etkin değeri ile çarpılarak, aktif (P_{hes}) ve reaktif güç (Q_{hes}) bileşenleri hesaplanmıştır. Güç bileşenlerinin aynı PI denetleyici ($PI(2)$) ile kontrol edilmesi için bu değerler matris formuna getirilmiştir.



Şekil 4. Kontrol işlemlerinin blok gösterimi

Referans aktif güç (P_{ref}) ve referans güç katsayısı ($\cos \theta$) haricen girilmektedir. Eviricinin reaktif gücü hesaplandığından, $\cos \theta$ değeri kullanılarak referans reaktif güç (Q_{ref}) hesaplanmıştır. Hesaplanan ve ölçülen güç değerlerinin farkları alınarak hata sinyalleri elde edilmiştir. $PI(2)$ denetleyici bu hata değerlerine bağlı olarak, faz açısı ve modülasyon indeksi değerlerini oluşturmaktadır. Kontrol süreci sonunda elde edilen bu değerler referans sinüs sinyalleri üreten blokta sinüzoidal forma getirilmiştir. Üç faz için oluşturulan referans sinyallere bağlı olarak evirici anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Böylece, her iki güç bileşeni de referans değerlere göre kontrol edilmiştir. Kontrol sürecinden görüldüğü üzere, gerilim dengesizliği DA tarafta giderildiğinden güç akış yapısına herhangi bir ekleme yapılmamıştır.

3. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

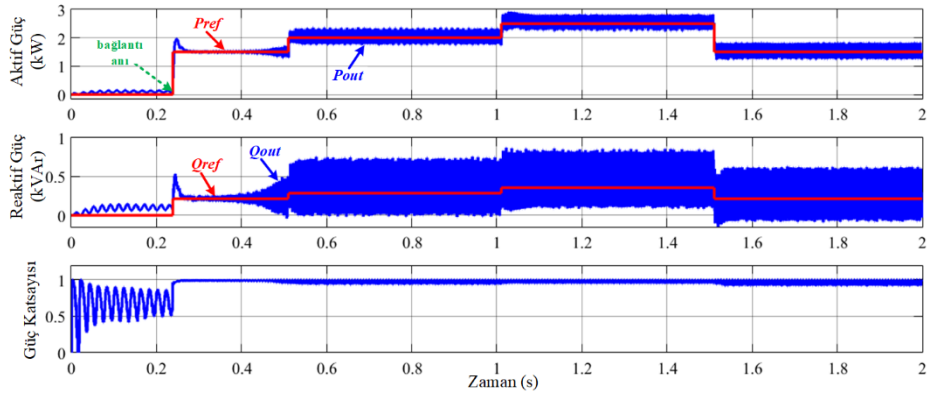
Önerilen sistemin doğrulanması için Şekil 1’de verilen güç ve kontrol yapıları Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Benzetim parametreleri Tablo 2’de sunulmuştur. Benzetim çalışmasında şebekeye güç akışının analizi için örnek bir senaryo oluşturulmuştur. Aynı model üzerinde, gerilim dengesizliği durumunun da incelenmesi için, güç yapısına Şekil 1’deki SM anahtarı eklenmiştir.

Tablo 2. Benzetim Parametreleri

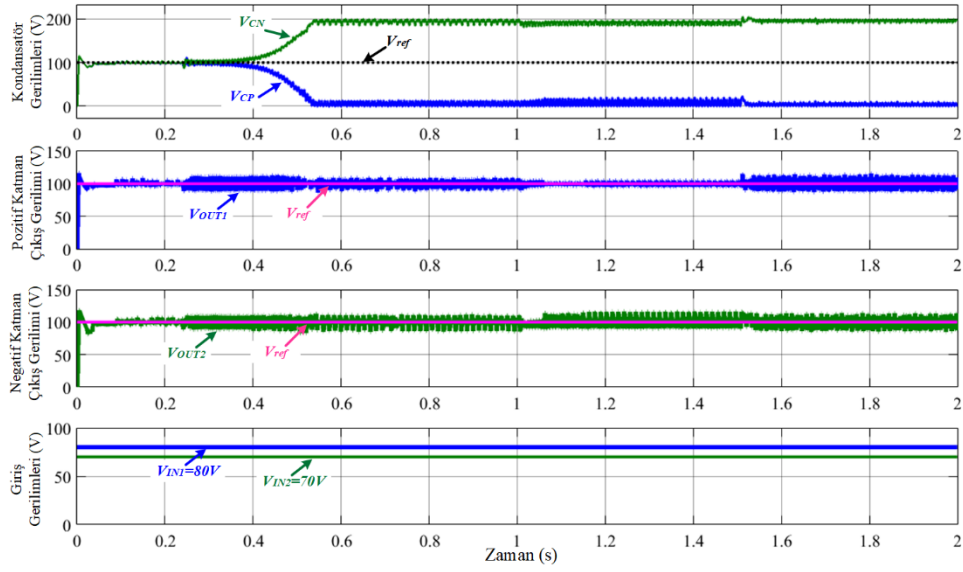
Parametre	Değeri
Kondansatör (C_P ve C_N)	1000 μF
Çevirici anahtarlama frekansı	5kHz
Bobin (L_1 ve L_2)	1mH
Filtre Kondansatörü (C)	10 μF
Bobin iç direnci (R_L)	0.2 Ω
Filtre bobini (L_{ac})	15mH
Evirici anahtarlama frekansı	2.5kHz
Şebeke	380V – 50Hz
Örnekleme süresi (T_s)	20 μs
$PI(1)$ ve $PI(2)$ örnekleme süresi	100 μs
$PI_{DC(1)}$ ve $PI_{DC(2)}$ örnekleme süresi	200 μs

Benzetim çalışmaları öncelikle gerilim dengesinin kontrol edilmediği durum ($S_M=0$) için gerçekleştirilmiştir. Bu duruma ait sonuçlar Şekil 5-7’de sunulmuştur. Evirici kontrolünde belirtildiği üzere, şebeke bağlantısı gerçekleşmeden önce, eviricide üretilen gerilimin şebeke şartlarına getirilmesi için kontrol işlemleri yürütülmektedir. Şekil 5’te verilen güç bileşenlerine ait sonuçlardan görüldüğü üzere, *bağlantı anı* öncesinde evirici yüksüz olduğundan sadece filtre üzerinde güç harcanmaktadır. Filtre sadece reaktif elamanlar barındırdığından güç katsayısı sürekli olarak değişmektedir. Şebeke bağlantısının gerçekleşmesi ile kontrol mekanizması güç akışını denetlemeye başlamaktadır. 1,5kW aktif güç ve 0.99 sabit güç katsayısı başlangıç koşulları ile evirici – şebeke arası bağlantı gerçekleşmiştir. Bu referans değerler ile çalışma sürecinde (*başlangıç anı* - 0.4s), güç akışı küçük salınımlar ile sağlanmaktadır.

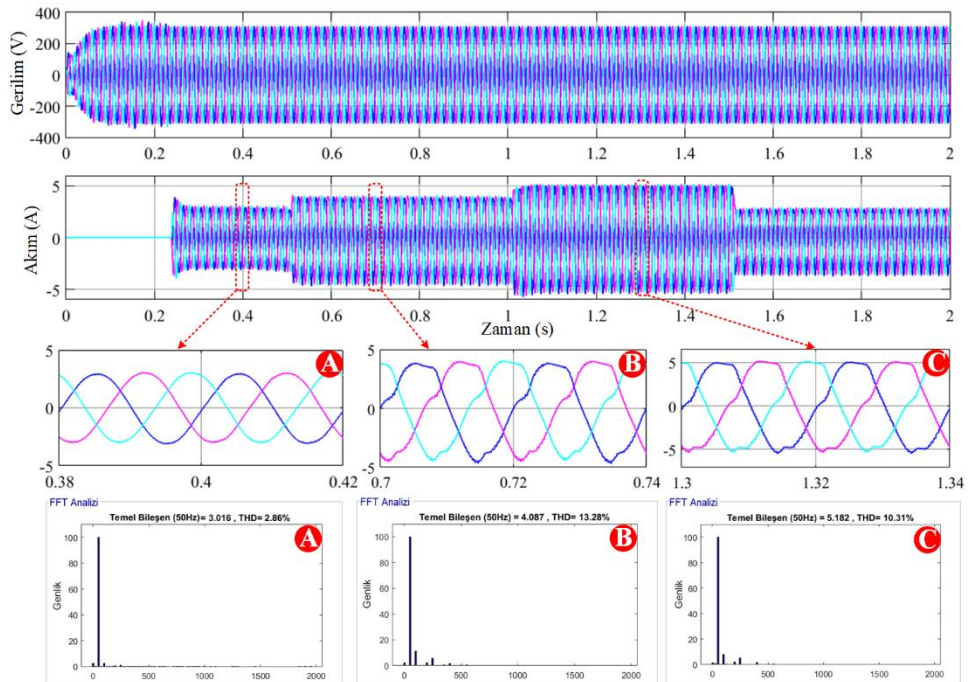
Başlangıçtan sonra ise hem aktif güç hem de reaktif güç üzerindeki salınımlar artarak devam etmektedir. Aynı zaman diliminde, kondansatör gerilimleri (V_{CP} ve V_{CN}) arasındaki farkın giderek arttığı Şekil 6’daki sonuçlardan görülmektedir. Bu esnada, çevirici katmanları arasındaki anahtar (SM) açık olduğundan, çevirici çıkış gerilimleri kondansatör gerilimlerinden farklı değerlerdedir. Her iki katmanı kontrol eden PI denetleyicilerin farklı giriş gerilimlerine rağmen, çevirici çıkışlarının ortalama değerini referansa (100V) eşitlediği görülmektedir. Böylece, DA bara gerilimi her zaman 200V seviyesinde tutulmaktadır. Fakat kondansatörler arası gerilim dengesi kontrol edilmediğinden neredeyse tüm DA bara gerilimi V_{CN} kondansatörüne aktarılmaktadır.



Şekil 5. Kontrolsüz nötr noktası durumundaki güç sonuçları



Şekil 6. Kontrolsüz nötr noktası durumundaki çevirici ve kondansatör gerilimleri



Şekil 7. Kontrolsüz nötr noktası durumundaki gerilim, akım ve bozunum sonuçları

Güç akışının ve farklı yüklenme oranlarında gerilim dengesizliği durumlarının incelenmesi için referans güç değerleri basamak şeklinde değiştirilmiştir. Bu değişimlere rağmen DA bara geriliminin 200V seviyesine sabitlendiği Şekil 6'dan görülmektedir. Fazlara ait gerilim ve akım sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Referans güç değerinin değiştirildiği anlarda eviriciden şebekeye aktarılan akım değerlerinin de değiştiği şekilden görülmektedir. Güç kademelerindeki akım sonuçlarının incelenmesi için detaylı grafikler (A, B ve C) aynı şekil üzerinde verilmiştir.

Şekil 7'deki A sürecine ait detaylı akım grafiğinden, sinyal üzerinde yüksek seviyede bozucu bir etkinin olmadığı söylenebilir. Bu süreçte gerilim dengesizliği olmadığından, toplam bozunum %2.86'dır ve bu değer IEEE 1547 standardında belirtilen %5 sınırının altındadır.

Güç akışının ve farklı yüklenme oranlarında gerilim dengesizliği durumlarının incelenmesi için referans güç değerleri basamak şeklinde değiştirilmiştir. Bu değişimlere rağmen DA bara geriliminin 200V seviyesine sabitlendiği Şekil 6'dan görülmektedir. Fazlara ait gerilim ve akım sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Referans güç değerinin değiştirildiği anlarda eviriciden şebekeye aktarılan akım değerlerinin de değiştiği şekilden görülmektedir. Güç kademelerindeki akım sonuçlarının incelenmesi için detaylı grafikler (A, B ve C) aynı şekil üzerinde verilmiştir.

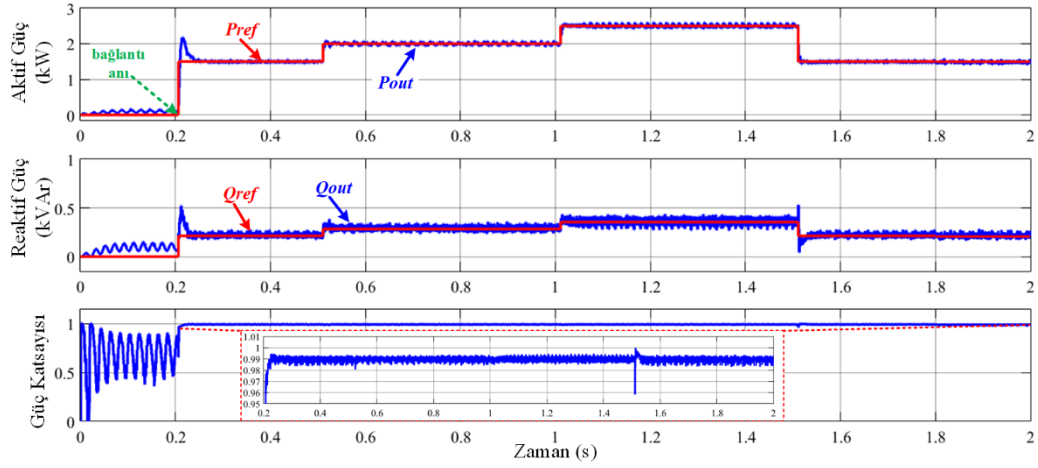
Şekil 7'deki A sürecine ait detaylı akım grafiğinden, sinyal üzerinde yüksek seviyede bozucu bir etkinin olmadığı söylenebilir. Bu süreçte gerilim dengesizliği olmadığından, toplam bozunum %2.86'dır ve bu değer IEEE 1547 standardında belirtilen %5 sınırının altındadır. Referans değer 2kW iken detaylı akım sonuçları B grafiğinde verilmiştir. Bu süreçte, kondansatörler arasındaki gerilim dengesizliği en yüksek seviyededir. Akım grafiğinden görüldüğü üzere, dalga formu oldukça bozuktur ve toplam bozunum %13.28'dir.

Referans değer 2.5kW olduğu durumun incelenmesi için verilen C sürecinde de akım dalga formunun oldukça yüksek bozunuma (%10.31) sahip olduğu görülmektedir. Bu süreçte de gerilim dengesizliği maksimum seviyededir.

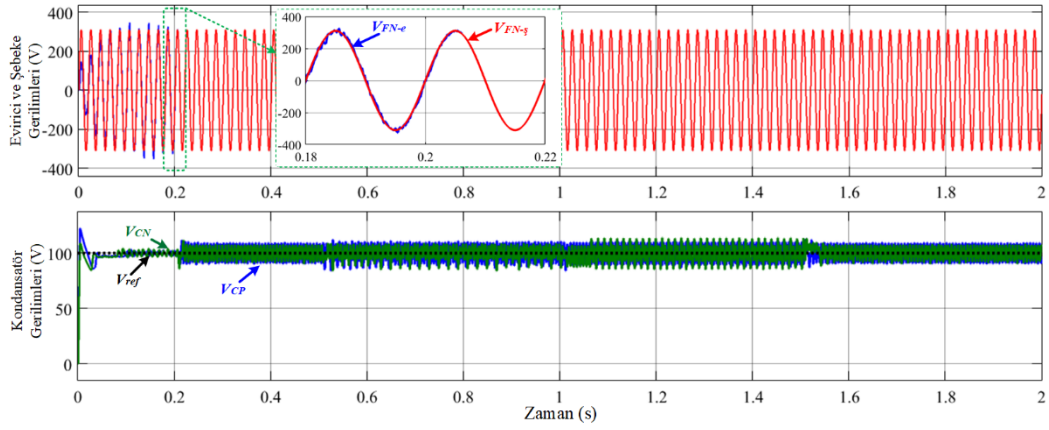
Yüksek bozunuma sahip akımlar sadece güç kalitesini değil güç akış kontrolünü de olumsuz etkilemektedir. Şekil 6'da verilen güç sonuçlarından görüldüğü üzere, şebekeye transfer edilen güç, referans değeri yüksek bir salınım ile takip etmektedir.

Kontrolsüz durumda elde edilen kontrol süreci ve güç kalitesine ait sonuçların karşılaştırılması için aynı koşullar altında sadece nötr noktasındaki anahtar (SM) kapatılarak benzetim çalışması tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 8-10'da verilmiştir. Nötr noktasını çevirici çıkışlarının ortak noktası ile birleştiren anahtar kapalı olduğundan kondansatör gerilimleri ilgili çevirici çıkış katman gerilimlerine eşittir. Bu nedenle, Şekil 9'da sadece kondansatör gerilimleri verilmiştir. Bağlantı anı öncesindeki güç parametrelerinin kontrolsüz durumla benzer olduğu Şekil 8'deki sonuçlardan görülmektedir. Aynı süreçte kondansatör gerilimlerinin küçük bir salınım ile referans değere eşitlendiği Şekil 9'da görülmektedir. Bağlantı anının incelenmesi için evirici ve şebeke gerilimlerinin detaylı grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Her iki sinyalin faz açısı ve genliği eşitlendiğinde şebeke bağlantısı gerçekleşmekte ve güç kontrol süreci başlamaktadır.

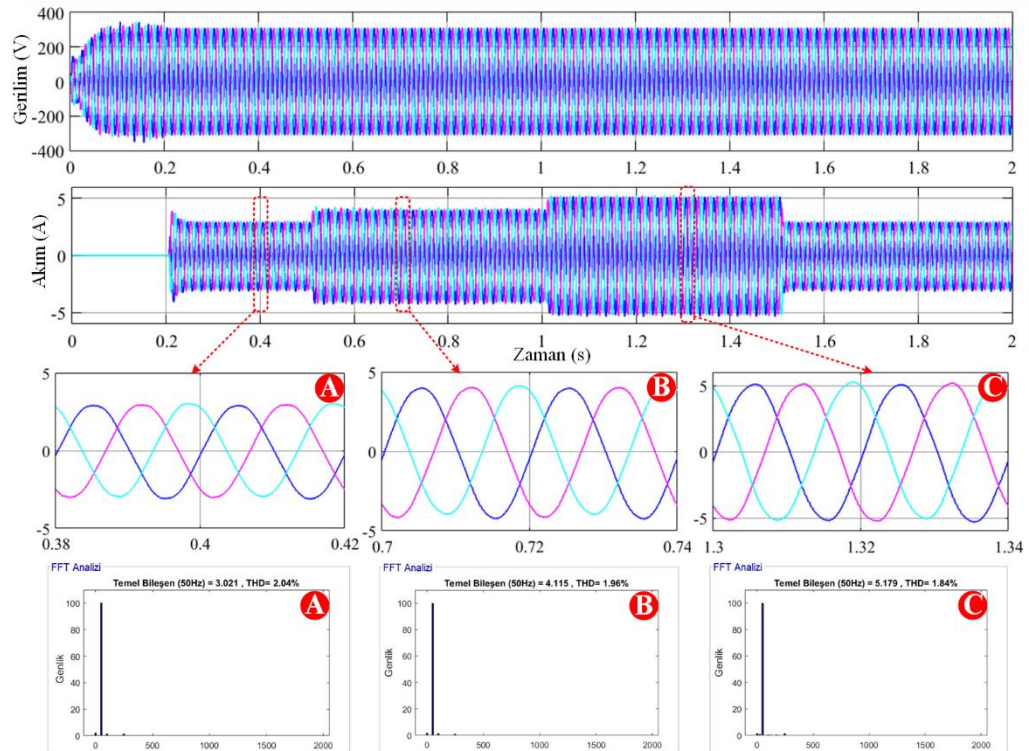
Kontrolsüz durumda olduğu gibi bağlantı anından sonra referans aktif güç 1.5kW ve referans güç katsayısı 0.99'dur. PI denetleyici, güç değerlerini yaklaşık 0.05s'de referanslara eşitlemiştir. Şekil 8'de verilen sonuçlar, bu süreçten itibaren oluşturulan basamak değişimlerde de güç takibinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Aynı zamanda, reaktif güç kontrolünün de sağlandığı güç katsayısı sonuçlarından görülmektedir. Referans gücün, 2.5kW'tan 1.5kW'a düşürüldüğü son basamakta güç katsayısı kısa süre 0.96'ya düşmüştür. Bu sürenin hemen ardından, kontrolör güç katsayısını tekrar 0.99'a sabitlemiştir. Çalışmanın temel hedefleri, çok kaynaklı çalışabilirlik ve gerilim dengesizliğinin giderilmesi olduğundan güç akışı kontrolüne ait daha fazla detay tartışılmamıştır.



Şekil 8. Nötr noktasının kontrollü olduğu duruma ait güç sonuçları



Şekil 9. Nötr noktasının kontrollü olduğu duruma ait evirici ve kondansatör gerilimleri



Şekil 10. Nötr noktasının kontrollü olduğu duruma ait gerilim, akım ve bozunum sonuçları

Güç değişimleri esnasında kondansatör gerilimi sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Eviricinin şebeke etkileşimli çalışmaya başlamasının ardından, kondansatörden çekilen akımın artması salınımları da artırmaktadır. Fakat gerilimlerin ortalama değeri referansa (100V) eşittir.

Benzetim çalışmaları boyunca ölçülen akım ve gerilim sinyalleri Şekil 10'da verilmiştir. 1.5kW referans değer için verilen A sürecinde, akım sinyali üzerinde yüksek bir bozucu etkinin olmadığı grafikten görülmektedir. Bu süreçte toplam bozunum %2.04'tür. Kontrolsüz çalışma durumuna göre toplam bozunum %0.8 azalmıştır.

Referans değer 2kW'a çıkarılması durumuna ait sonuçlar, B ile belirtilen detay grafiği ve bozunum analizinde verilmiştir. Akım sinyalinin oldukça ideale yakın ve bozunum değerinin %1.96 olduğu analiz sonuçlarından görülmektedir. Kontrolsüz durumdaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında bozunumların önemli oranda azaltıldığı söylenebilir.

C detay grafiği ve bozunum analizi, evirici 2.5kW referans değer ile çalışırken elde edilmiştir. Akım üzerindeki bozunumların %1.84 gibi oldukça düşük değere sahip olduğu analiz sonucundan görülmektedir. Kontrolsüz durumdaki aynı sürece göre bozunumlar, önemli oranda azaltılarak standartlarda belirtilen limitin altına indirilmiştir.

Nötr noktası kontrollü ve kontrolsüz iken yapılan benzetim çalışmaları, gerilim dengesizliğinin bozunumları olumsuz etkilediğini ve bu durumun önerilen çevirici yapısı ile DA barada giderildiğini göstermiştir.

Kontrollü ve kontrolsüz durum için elde edilen sonuçlar IEEE 1547 standartlarına göre bileşen bazında ve toplam bozunum olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Belirli bir bileşen aralığı için toplam bozunum ($THD_{n \rightarrow m}$) Denklem 6 kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma durumlarındaki bozunum sonuçlarının karşılaştırması Tablo 3'te sunulmuştur. Tablodan görüldüğü üzere, 11'inci bileşenden küçük sinyallerin %4'ü aşmaması, 11 ile 17 bileşen arasında kalan sinyallerin ise %2 değerinden düşük olması standartlarda belirtilen limitlerdir. Bu çalışmada elde edilen benzetim sonuçlarında 17'nci bileşenden sonra bozunum görülmediğinden incelemeler bu değere kadar yapılmıştır.

$$THD_{n \rightarrow m} = \frac{\sqrt{\sum_{n=11}^m i_n^2}}{i_1} \quad 6$$

Burada;

n : İlk bozunum bileşeni

m : Belirtilen aralık için son bozunum bileşeni

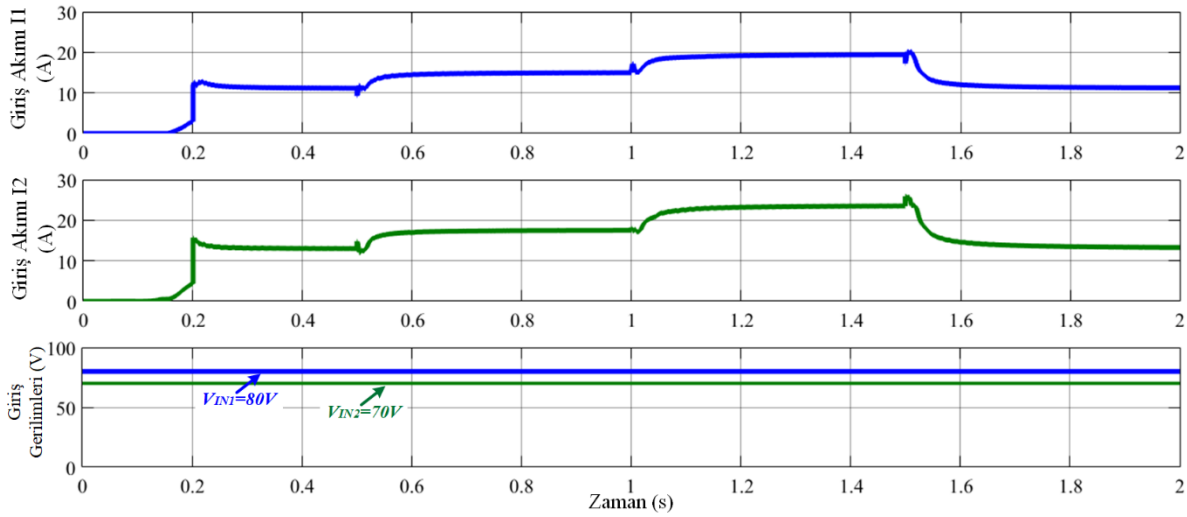
i_1 : Temel bileşen

Tablo 3. IEEE 1547 Standartlarına Göre Detaylı Bozunum Sonuçları

		$h < 11$ (%)	$11 \leq h < 17$ (%)	THD (%)
Limit		%4	%2	%5
Kontrolsüz	A	2.84	0.33	2.86
	B	13.25	0.85	13.28
	C	10.28	0.82	10.31
Kontrollü	A	2.04	0	2.04
	B	1.96	0	1.96
	C	1.83	0.19	1.84

Tablo 3'te verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, gerilim dengesinin kontrolsüz olduğu benzetim sonuçlarındaki *B* ve *C* sürecinde bozunumlar belirtilen limitlerin üzerindedir. Kontrollü durum için elde edilen sonuçlardaki tüm süreçlerde bozunumlar limitlerin oldukça altındadır.

Önerilen model ile hedeflenen diğer bir durum da NKE modelinin çok girişli hale getirilmesi olarak belirtilmişti. Bu durumun incelenmesi için, giriş akımlarının ortalama değerleri (I_1 ve I_2) ve giriş gerilimleri (V_{in1} ve V_{in2}) Şekil 11'de verilmiştir. Başlangıçta kondansatörlerin boş olması sebebiyle çekilen yüksek akımlar şekilde verilmemiştir. Ortalama akım değerleri, kondansatör gerilimlerinin kararlı duruma geçmesinden sonra çizdirilmiştir.



Şekil 11. Çevirici giriş akım ve gerilimleri

Şekil 11'den görüldüğü üzere, evirici – şebeke etkileşiminin 1.5kW referans ile başlamasının ardından, her iki giriş kaynağından çekilen akımlar ani olarak artmıştır. Benzetim süresi boyunca giriş gerilimlerinin farklı olması sebebiyle kaynak akımları da birbirinden farklı değerdedir. Güç akışı için yapılan diğer basamak değişimlerinde de her iki kaynaktan güç akışının devam ettiği Şekil 11'de görülmektedir. Bu durumlar çeviricinin çok kaynaklı çalışabilirliği sağladığını doğrulamaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada nötr kenetlemeli eviricilerin çok kaynaklı çalışabilmesi ve gerilim dengesizliğinin giderilmesi için iki giriş – iki çıkışlı bir DA-DA çevirici modeli oluşturulmuştur. Nötr kenetlemeli evirici, önerilen çevirici modeli üzerinden iki giriş kaynağına entegre edilmiştir. Giriş kaynaklarından şebekeye güç akışını kontrol eden denetleyici yapılarına ait detaylı incelemeler sunulmuştur.

Önerilen model ve kontrol işlemlerinin testi için benzetim çalışmaları yapılarak güç akışı, çok kaynaklı çalışabilirlik ve gerilim dengesizliği durumları incelenmiştir. İki giriş kaynağında üretilen enerjinin önerilen çevirici yapısı üzerinde birleştirildiği ve NKE aracılığıyla şebekeye güç akışının sağlandığı doğrulanmıştır. Bununla birlikte, gerilim dengesizliğinin kontrollü ve kontrolsüz olduğu durumlar için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Nötr noktası kontrolsüz olarak gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, güç akışının giriş kondansatörlerindeki gerilim eşitliğini bozduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak, evirici çıkış akımı üzerindeki toplam bozunum %13 gibi standartlarda kabul edilmeyen seviyelere yükselmiştir. Önerilen çevirici modeli ile gerilim dengesinin sağlandığı ve bozunumların %2 gibi IEEE 1547 standartlarında belirtilen limitin oldukça altında değerlere düşürüldüğü yapılan benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: 07/2017-08) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Özçira, Aktif Güç Filtre Tipinin Kompanze Edilmesi Gereken Büyüklüğe Göre Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(3) (2018) 691-704.
- [2] M. Schweizer, J. W. Kolar, Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, 28: 2 (2013) 899-907.
- [3] K. Komatsu, M. Yatsu, S. Miyashita, S. Okita, H. Nakazawa, S. Igarashi, Y. Takahashi, Y. Okuma, Y. Seki, T. Fujihira, New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters, International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -, Sapporo, (2010) 523-527.
- [4] P. Kakosimos, H. Abu-Rub, Predictive Control of a Grid-Tied Cascaded Full-Bridge NPC Inverter for Reducing High-Frequency Common-Mode Voltage Components, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14: 6 (2018) 2385-2394.
- [5] M. Szarek, A. Penczek, R. Stala, S. Piróg, A. Mondzik, NPC three level inverter with dual DC bus for independent distributed generators. Neutral-point voltage balancing under the input power imbalance, 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, (2017) 1-10.
- [6] I. Forrissi, J. P. Martin, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, PV-grid system in mismatch operating mode: Improvement through a new voltage balancing method in multilevel NPC inverters, IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, CA, (2016) 1280-1285.
- [7] Y. Liu, H. Abu-Rub, B. Ge, Front-End Isolated Quasi-Z-Source DC-DC Converter Modules in Series for High-Power Photovoltaic Systems—Part I: Configuration, Operation, and Evaluation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64:1 (2017) 347-358.
- [8] R. Faraji, H. Farzanehfard, Soft-Switched Nonisolated High Step-Up Three-Port DC-DC Converter for Hybrid Energy Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, 33:12 (2018) 10101-10111.
- [9] E. Irmak, N. Güler, Application of A Boost Based Multi-Input Single-Output DC/DC Converter, 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, USA, (2017) 955-961.
- [10] Chung-Ming Young, Ting-Ruei Fan, Two-stage interleaved three-level DC/AC converter with neutral point voltage balancing, IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC), Kaohsiung, (2017) 1430-1434.
- [11] P. Wang, L. Zhou, Y. Zhang, J. Li, M. Sumner, Input-Parallel Output-Series DC-DC Boost Converter With a Wide Input Voltage Range, For Fuel Cell Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66: 9 (2017) 7771-7781.
- [12] A. Ganjavi, H. Ghoreishy, A. A. Ahmad, A Novel Single-Input Dual-Output Three-Level DC-DC Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65: 10 (2018) 8101-8111.
- [13] N. Güler, E. Irmak, Design and Application of A Novel Single Input - Multi Output DC/DC Converter, IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, (2016) 1039-1045.
- [14] B. Wang, L. Xian, V. R. K. Kanamarlapudi, K. J. Tseng, A. Ukil, H. B. Gooi, A Digital Method of Power-Sharing and Cross-Regulation Suppression for Single-Inductor Multiple-Input Multiple-Output DC-DC Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64: 4 (2017) 2836-2847.

- [15] Y. Tong, Z. Shan, J. Jatskevich, A. Davoudi, A nonisolated multiple-input multiple-output DC-DC converter for DC distribution of future energy efficient homes, 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, TX, (2014) 4126-4132.
- [16] P. Mohseni, S. H. Hosseini, M. Sabahi, T. Jalilzadeh, M. Maalandish, A New High Step-Up Multi-Input Multi-Output DC-DC Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Basım aşamasında (2018).
- [17] L. Zhang, K. Sun, M. Gu, D. Xu, Y. Gu, A Capacitor Voltage Balancing Control Method for Five-Level Full-Bridge Grid-Tied Inverters Without Split-Capacitor Voltage Sampling, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 6: 4 (2018) 2042-2052.
- [18] E. Irmak, N. Güler, Model predictive control of grid-tied three level neutral point clamped inverter integrated with a double layer multi-input single output DC/DC converter, IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Doha, (2018) 1-6.
- [19] C. Zhang, C. Hu, G. Fang, H. Li, Z. Qian, An improved SVPWM strategy for three-level active NPC inverter, 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Siem Reap, (2017) 292-296.
- [20] C. Hu, G. Holmes, W. Shen, X. Yu, Q. Wang, F. Luo, Neutral-point potential balancing control strategy of three-level active NPC inverter based on SHEPWM, IET Power Electronics, 10: 14 (2017) 1943-1950.
- [21] F. Donoso, A. Mora, R. Cárdenas, A. Angulo, D. Sáez, M. Rivera, Finite-Set Model-Predictive Control Strategies for a 3L-NPC Inverter Operating With Fixed Switching Frequency, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65: 5 (2018) 3954-3965.
- [22] Ş. Özdemir, Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Tek Aşamalı MPPT Denetimli Çok Seviyeli Eviricinin Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi (2013).
- [23] G. I. Orfanoudakis, S. M. Sharkh, M. A. Yuratich, Circuit for reducing devices voltage stress due to DC-link capacitor voltage ripple in a Neutral-Point-Clamped inverter, Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham, (2011) 1-10.
- [24] B. Ren, X. Sun, S. An, X. Cao, Q. Zhang, Analysis and design of an LCL filter for the three-level grid-connected inverter, Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Harbin, (2012) 2023-2027.



Hafif Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sisteminin Tasarım, İmalat ve Performansının İncelenmesi

Gökhan SUR¹, İsmail KAYABAŞI^{2,*}

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78080, KARABÜK

²Kastamonu Üniversitesi, Küre Meslek Yüksek Okulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü 37902, Küre/KASTAMONU

Öz

Bu çalışmada, ergimiş metal karıştırma tekniği ile hafif metal matrisli parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimine yönelik bir üretim sistemi tasarlanmış, imal edilmiş ve başarımı ile ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir. Üretim sistemi tasarımında, benzerlerine kıyasla kullanım kolaylığı ve kullanım ergonomisinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda ergitme fırını ile karıştırma sistemi ebat ve konumu belirlenmiş, takviye elemanı ilave etme yeri ile ergitme potasının fırın içine/dışına hareketleri ile ilgili mekanik-elektrik bileşenlerden oluşan kompakt bir tasarım gerçekleştirilmiş ve üretilmiştir. Üretim sisteminin başarımlarında, matris malzemesini ergitme kabiliyeti ve kompozit malzeme üretiminde homojen parçacık dağılımının elde edilmesiyle ilgili bazı karakteristik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla; bir adet takviyesiz AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ve AA 6060/SiC parçacık takviyeli iki adet kompozit üretilmiştir. Kompozitlerin imalinde ortalama tane boyutu 200 mesh SiC parçacıkları kullanılmıştır. Takviye oranı ise hacimce %7 ve %10'dur. Üretim sisteminin başarımlarını testleri doğrultusunda, üretilen numunelerin mikroyapı, yoğunluk ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde kompozit numunelerde takviye elemanının kısmen homojen dağılım sergilediği görülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri hacimce %10 SiC içeren metal matrisli kompozitin en yüksek sertliğe sahip olduğunu göstermiştir. Yoğunluk ölçümleri, SiC takviyeli kompozitin takviye hacim oranı arttıkça, yoğunluğunun ve gözenek miktarının arttığını göstermiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 20/04/2018
 Düzeltilme: 08/01/2019
 Kabul: 10/01/2019

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzemeler
 Metal matrisli kompozit
 Karıştırma döküm tekniği
 Mikroyapı
 Mekanik özellikler

Keywords

Composite materials
 Metal matrix composite
 Stir casting technique
 Micro structure
 Mechanical properties

Investigation of Design, Manufacturing and Performance of Light Metal Matrix Composite Material Production System

Abstract

In this study, a production unit for light metal based particle reinforced composite material with stir casting technique was designed, manufactured and experiments related to performance have been carried out. In production system design, it is aimed to provide ease of use and ergonomics of usage compared to similar ones. In line with this objective, the size and location of the melting furnace and the mixing system were determined, a compact design of the reinforcing element with mechanical and electrical components related to the movement of the melting pot in / out of the furnace. In the performance tests of the unit, the characteristics of melting the matrix material and obtaining homogeneous particle distribution in the production of composite material were investigated. For this purpose; one unreinforced AA 6060 aluminum alloy material and SiC particle reinforced AA 6060 matrix two composites were manufactured. Average particle size 200 mesh SiC particles were used in the production of composites. The volume of SiC reinforcing ratio of the manufactured composites is 7% and 10%. Microstructure, density and hardness properties of the produced samples were investigated in the direction of the unit's performance tests. According to the microstructure analysis, it has been observed that composite with metal matrix is homogeneous in part. According to the hardness analysis, it has been identified that metal matrix composite containing 10% SiC has the highest hardness. As a result of the density measurement, as the volume of the reinforcement ratio in the metal matrix composite with SiC reinforcement increases, the density and porosity of the material increases.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla dayanım/özlük ağırlık oranı yüksek malzemelerdir. Ayrıca, elastikiyet modülleri kendini oluşturan matris alaşımına kıyasla daha yüksektir. Birçok kompozit, kendisinden arzu edilen (aşınma ve korozyon direnci, elektriksel ve termal özellikler, servis sıcaklığı, vb.) özellikleri sergileyebilecek tarzda üretilebilmektedir. Kompozitlerin bu üstün özellikleri nedeniyle, son yıllarda otomotiv, havacılık, uzay sanayi ve nükleer enerji gibi alanlarda geleneksel malzemelere göre kullanım oranları giderek artmaktadır [1–4]. Bu alanlarda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerden biri de metal matrisli kompozitlerdir (MMK). MMK'lar matris ve takviye elemanı olarak adlandırılan iki bileşenden meydana gelmektedir. MMK'larda alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımları gibi hafif metaller matris malzemesi olarak yaygın kullanıma sahiptir. MMK'larda sürekli elyaf veya sürekli olmayan elyaf/partikül biçiminde alümina, silisyum karbür, bor nitrid gibi seramikler takviye elemanı olarak kullanılmaktadır [5–8].

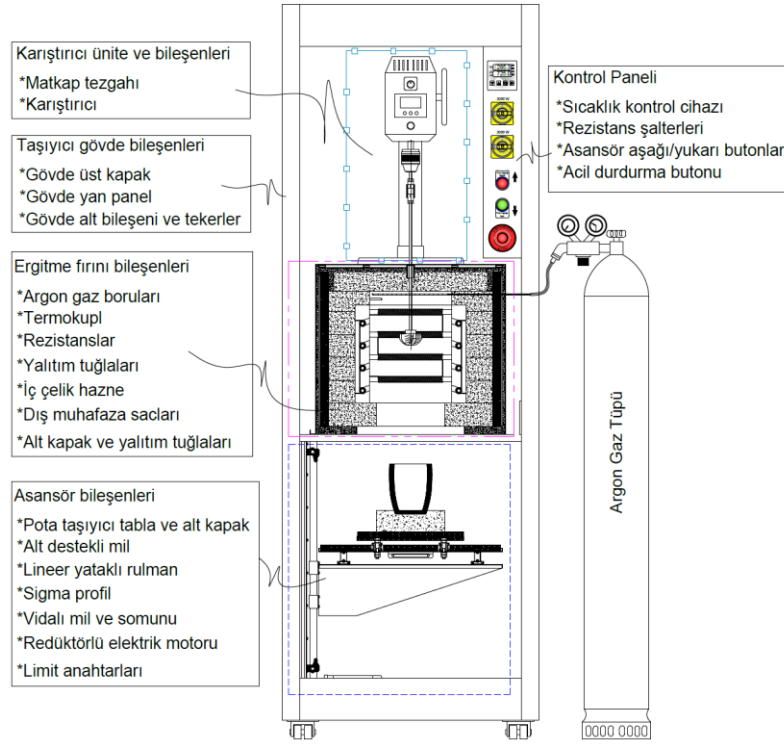
MMK'ların üretimi için çok farklı üretim yöntemleri kullanılmaktadır [9]. Bu üretim yöntemleri sıvı, katı-sıvı ve katı hal olarak üç ana başlık şeklinde sınıflandırılmaktadır [2, 10]. Her üretim yönteminin diğerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Sıvı hal üretim tekniklerinin diğer üretim tekniklerine kıyasla en önemli avantajları, düşük ilk yatırım ve hammadde maliyetleri ile birim ürün maliyeti düşük kompozitlerin üretilebilmesine olanak tanımları sayılabilir [11]. Karıştırmalı döküm, sıvı metal emdirme, püskürtme halinde biriktirmeli döküm ve denge halinde faz oluşturma (in-situ) yöntemi sıvı hal üretim tekniklerindedir [12]. Sıvı hal üretim yöntemlerinden karıştırmalı döküm yöntemi; büyük miktarlarda üretimin yapılabilmesi, üretimde esneklik ve üretim sadeliği gibi avantajlarından dolayı tüm dünyada ilgi çekmektedir. Literatürde, karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen MMK'larda takviye elemanı-matris arasındaki ıslatılabilirlik problemlerinden kaynaklanan kusurların oluştuğu ve döküm sonrası elde edilen yapı içerisinde gözenekliliğin kaçınılmaz olduğu belirtilmiştir. Fakat, bu problemlerin etkili karıştırma ve basınç altında döküm ile azaltılabildiği de vurgulanmaktadır [13–17].

Bu çalışmada, ergimiş metal karıştırma tekniği ile hafif metal matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılacak bir üretim sisteminin tasarımı ve imalatının yapılarak, performansının belirlenmesine yönelik çalışmaların yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, bir adet takviyesiz AA 6060 alüminyum alaşımı malzeme ve iki adet hacimce %7 ve %10 SiC takviye oranına sahip AA 6060 alüminyum alaşımlı kompozit imal edilmiştir. İmal edilen malzemelerin mikroyapı, yoğunluk ve sertlik özellikleri incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sistemi Bileşenlerinin Tasarımı ve İmalatı (Metal Matrix Composite Material Production Unit Design and Produce of Components)

MMK üretim sistemi tasarlamak ve sistemi oluşturan elemanları belirlemek amacıyla literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan literatür araştırması sonucunda üretim sisteminin; koruyucu atmosferli ergitme fırını, matkap tezgahı, karıştırıcı, taşıyıcı gövde, hidrolik pres ve kalıptan oluşturulması gerektiği tespit edilmiştir. Sistemin tasarımında, benzerlerine kıyasla kullanım kolaylığı ve kullanım ergonomisinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda ergitme fırını ile karıştırma sistemi ebat ve konumu belirlenmiş, takviye elemanı ilave etme yeri ile ergitme potasının fırın içine/dışına hareketleri ile ilgili mekanik-elektrik bileşenlerden oluşan kompakt bir tasarım yapılmış ve üretilmiştir. Tasarıma ait şematik görsel Şekil 1'de imalat süreçleri tamamlanmış kompozit malzeme üretim sistemine ait görsel ve teknik özellikler ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. MMK malzeme üretim sistemi ve malzeme üretiminde kullanılan yardımcı araç-gereçlere ait şematik görünüm



Teknik Özellikler	Değerler
Ergitme alanı boyutları, (en*boy*yükseklik):	25*25*34, (21,25 dm ³)
Dış hazne boyutları, (en*boy*yükseklik):	60*60*55 cm
En yüksek çalışma sıcaklığı:	1200 °C
Rezistans çapı ve sarım çapı:	1,5 mm, 16 mm
Rezistans toplam sarım boyu:	Her bir duvarda 1 m, toplam 4 metre.
Rezistans gücü:	Her biri 1000 W gücünde iki rezistans grubu birlikte devrede iken toplam güç: 2000 W
Atmosfer kontrolü:	Argon koruyucu atmosfer ortamının sağlanması için gerekli donanıma sahiptir.
Kapak şekli ve yeri:	Kare 22*22 cm boyutlarında, fırın alt kısmında yer almaktadır.
Kompozit malzeme üretim ünitesi dış boyutları, (en*boy*yükseklik):	80*80*220 cm
Pota alma sistemi:	DC elektrik motorlu, hareket hızı ayarlanabilir asansör sistemi
Dijital sıcaklık kontrolcü:	Elimko E72-4 PID kontrolcü 0,1°C ayar hassasiyeti
Termokupl:	PT100 K tipi
24 saat sürekli çalışmada dış yüzey sıcaklığı:	Yan duvarlar \approx 35°C Ön ve Arka kısımlar \approx Oda sıcaklığı
Dış gövde muhafaza sacları ve elektrik panosu:	Mevcut
Kompozit malzeme üretim ünitesi taşınma özelliği:	Gövde altı kilitli tekerlek sistemleri ile mümkündür.
Ek özellikler:	Karıştırıcı giriş deliği fırın üst kısmında iç çapı \varnothing 11 mm olan seramik boru ile sağlanmaktadır.

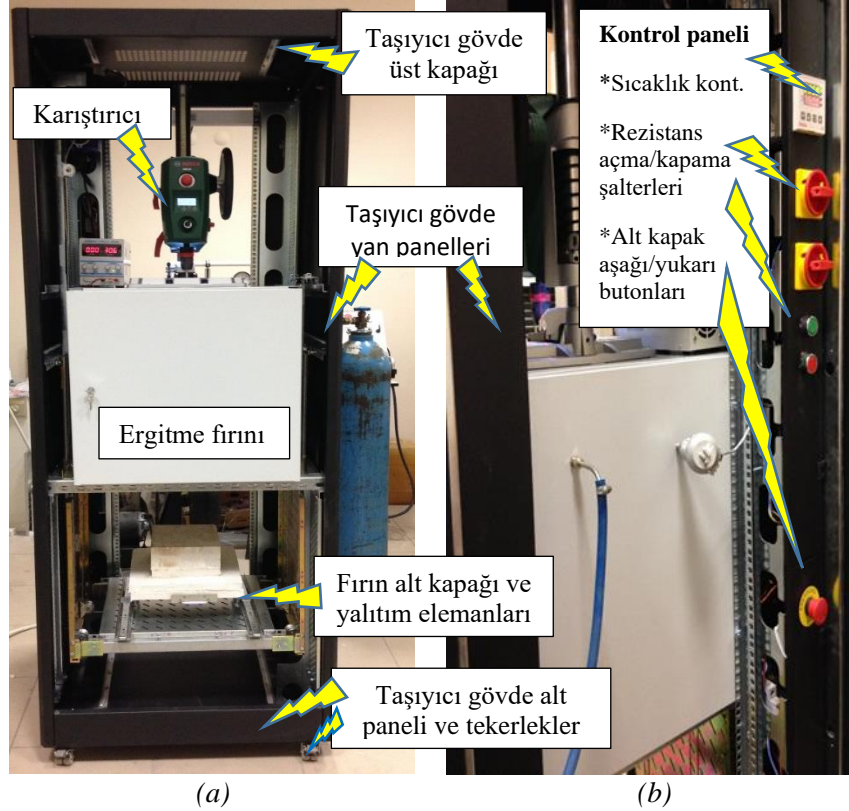
Şekil 2. İmalatı gerçekleştirilen MMK malzeme üretim sistemi ve teknik özellikleri

2.1.1. Taşıyıcı gövde (Carrier body):

Taşıyıcı gövde, hareket kabiliyetli, güvenlik açısından yan duvarları kapaklı, bünyesinde “Ergitme fırını”, “Kontrol ünitesi”, “Karıştırma ünitesi”, “Koruyucu atmosfer bileşenleri”, “Asansör sistemli pota yükleme/boşaltma ünitesi” ve kompozit malzeme ile ilgili yardımcı avadanlıkları barındıracak ve

taşıyabilecek dayanım özelliklerinde dizayn edilmiştir. Taşıyıcı gövde tasarımı ve yapı bileşenlerinin seçiminde standart insan vücut boyutları da göz önüne alınmış ergonomik bir yapı belirlenmiştir. Taşıyıcı gövde ve üretim sistemi geneli ile ilgili görseller Şekil 3’de sunulmuştur.

Kompozit üretim sistemi gövde aksamı, iki yönden müdahale edilebilir, alt tarafında yer alan tekerlekler sayesinde konumu ayarlanabilen, çelik muhafaza kabinli olarak üretilmiştir. Kabin ön paneli üzerinde, ergitme fırını için dijital sıcaklık kontrolcü, açma/kapama şalterleri, pota yükleme/boşaltma ünitesi aşağı/yukarı butonları ile tehlike anında acil durdurma işleminde kullanılan buton yer almaktadır.



Şekil 3. Taşıyıcı gövde ile ilgili görseller; a) Ön taraf, b) Arka taraf

2.1.2. Ergitme fırını (Melting furnace):

Hafif metal alaşımlarının (alüminyum, magnezyum, vb.) ergitilebilmesi için tasarlanan ergitme fırınlarının iç haznesinin, 1000°C sıcaklığa çıkabilmesi gerekir. Ayrıca, iç hazne sıcaklığının ayarlanan değerde $\pm 2\sim 5^\circ\text{C}$ hassasiyetinde, istenilen bekleme süresince kontrol edilmesi de gerekmektedir. Elektrikli ergitme fırınlarında sıcaklık rezistans telleri ile artırılır. Fırının çalışma sıcaklığı ve bu sıcaklığa ulaşma hızı ile çalışma ortamının koşulları rezistans telinin seçiminde önemli kriterlerdir. Rezistans telinin yapısında bulunan ana alaşım elementlerinin bileşim oranları, tel çapı ve uzunluğu ile sarım çapı arzu edilen özelliklerde bir ısıtma işlemi ve bu işlemin sürekliliği açısından önem taşımaktadır. Rezistans telinin alaşım malzemesinin seçiminde, telin sürekli çalışacağı en yüksek sıcaklık değerinde sergileyeceği dayanım özellikleri ve soğuma esnasında oluşacak büzülme ile çevresel etkenler ile olan etkileşim özellikleri (ortamdaki gazlara karşı reaksiyon duyarlılığı) belirleyicidir. Bu kıstaslar dikkate alınarak ergitme fırınının imalinde kullanılacak rezistans teli, “Kantal K1” sınıfı, $0,814 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ özdirençli, “25Cr5Al” alaşımli çelik tel olarak seçilmiştir. Tel çapı ise rezistansın uzun süre yüksek sıcaklıklarda dayanım sürekliliğinin sağlanması ve soğuma hızının etkilerinin en aza indirilmesi açısından $\varnothing 1,5 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Fırın iç haznesinin ısıtılmasında rezistans tellerine uygulanacak elektrik akımı 220 V AC’dir. Rezistansın en yüksek 2000 W gücünde ısıtma yapılabilmesi için gerekli tel boyu, Denklem 2.1-2.3’te verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2}{2000} = 24,2 \Omega \quad 2.1$$

Denklem 2.1’de yer alan semboller; R; Rezistans tel direnci (Ω), V; Voltaj (V), P; Güç (W) anlamındadır.

$$S = \frac{d^2}{1,27} = \frac{1,5^2}{1,27} = 1,77 \text{ mm}^2 \quad 2.2$$

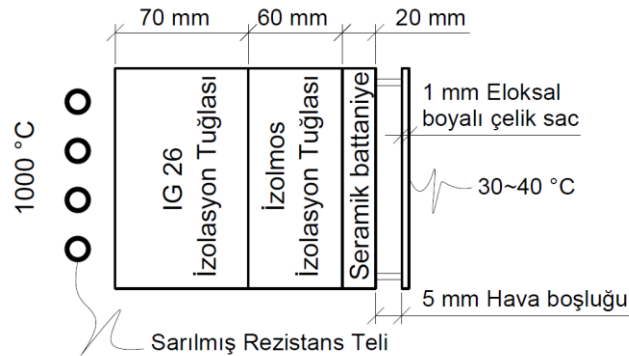
Denklem 2.2’de yer alan semboller; S; Rezistans teli kesit alanı (mm^2), d; Rezistans tel çapı (mm), anlamındadır.

$$L = \frac{R \times S}{\varphi} = \frac{24,2 \times 1,77}{0,814} = 52,62 \text{ m} \quad 2.3$$

Denklem 2.3’te yer alan semboller; L; Sarılmamış rezistans tel boyu (m), φ ; Rezistans teli öz direnci ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), R; Rezistans tel direnci (Ω), S; Rezistans teli kesit alanı (mm^2) anlamındadır.

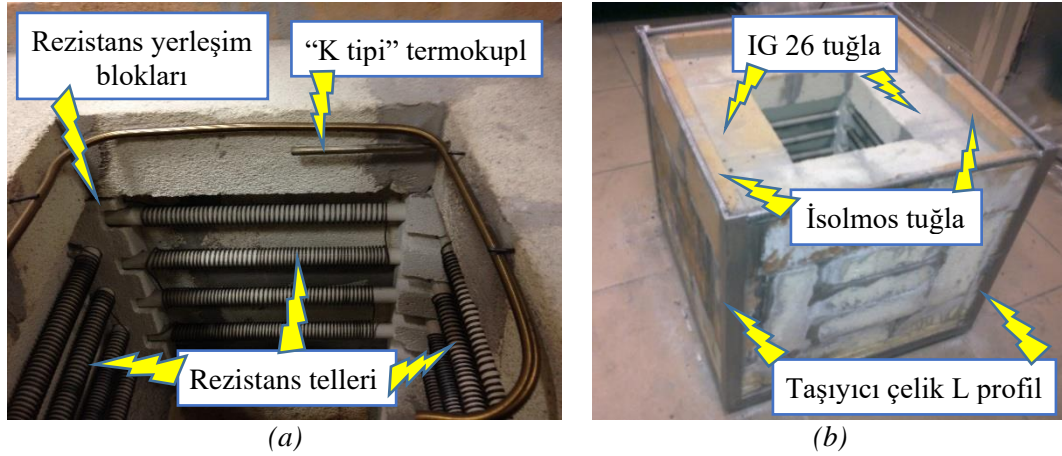
Yapılan hesaplamalar sonucunda arzu edilen özellikleri sergileyecek rezistans telinin en az 52,62 m uzunluğunda olması gerektiği tespit edilmiştir. Rezistans telinin bu boyutta fırın iç haznesi içerisine sığdırılması olanaksızdır. Bu nedenle belirli bir çapta sarmal hale getirilerek kullanılır. Sarım çapının belirlenmesinde, rezistans telinin sarım esnasında plastik deformasyonla şekillendirilmesinde herhangi bir kırılma veya yüzeyinde kılcal çatlak oluşumunun yaşanmayacağı en düşük sarım çapı değeri seçilir. Pratikte tel sarım çapının, tel çapının en az 10 (on) katı büyük bir değerde seçilmesi yeterlidir. Çalışmada sarım çapı 16 mm olarak seçilmiştir.

Rezistansların sıcaklık kontrolünün, K tipi termokupl ve PID sıcaklık kontrolcü ile gerçekleştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca ergitme fırını çalışırken, dış kabuk yüzeyinde oluşacak sıcaklık değerinin, çalışana zarar vermemesi için 30~40°C aralığında olması gerekir. Bu amaçla ısı yalıtım elemanlarının seçimi gerçekleştirilmiştir. Seçilen ısı yalıtım elemanları ve yerleşimi ile ilgili ergitme fırını yan duvar kesit görünüşü Şekil 4’de gösterilmiştir. Ergitme fırını alt ve üst yüzeyleri de yan duvarlara benzer, yalıtım elemanları ile kapatılmıştır.



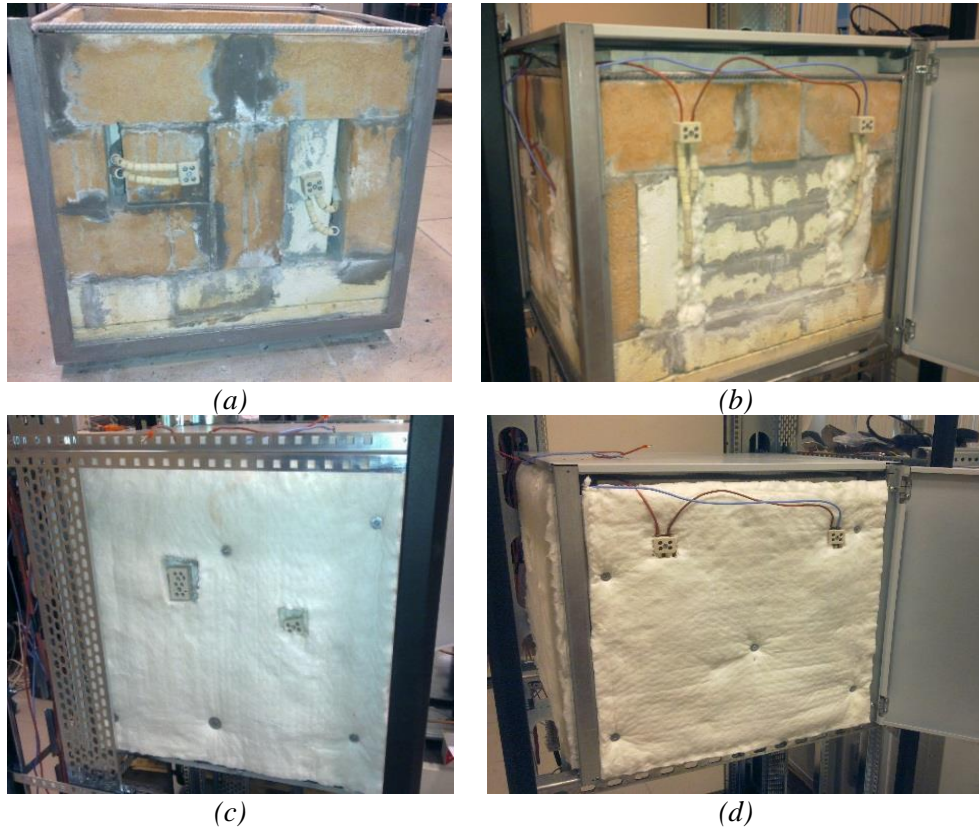
Şekil 4. Ergitme fırını yan duvar kesit görünüşü

Ergitme fırınlarında rezistanslar, elektrik yalıtımına sahip, pürüzlülüğü düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanımlı, telin hareketini kısıtlayan seramik borular üzerine yerleştirilir. Yerleştirme işleminde tel sargılarının birbirine temas etmemesine dikkat edilir. Çalışmada ergitme fırını iç haznesi, dikdörtgenler prizması şeklinde dizayn edilmiştir. Rezistans teller her bir dikdörtgen duvarda, çapı 16 mm, boyu 280 mm olan 4 (dört) adet seramik boru üzerine yerleştirilmiştir. Toplamda 16 (onaltı) seramik boru üzerine, açılmış boyu 52,62 m, sarılmış ve araları açılmış boyu 4 m olan rezistans tellerinin yerleşimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).

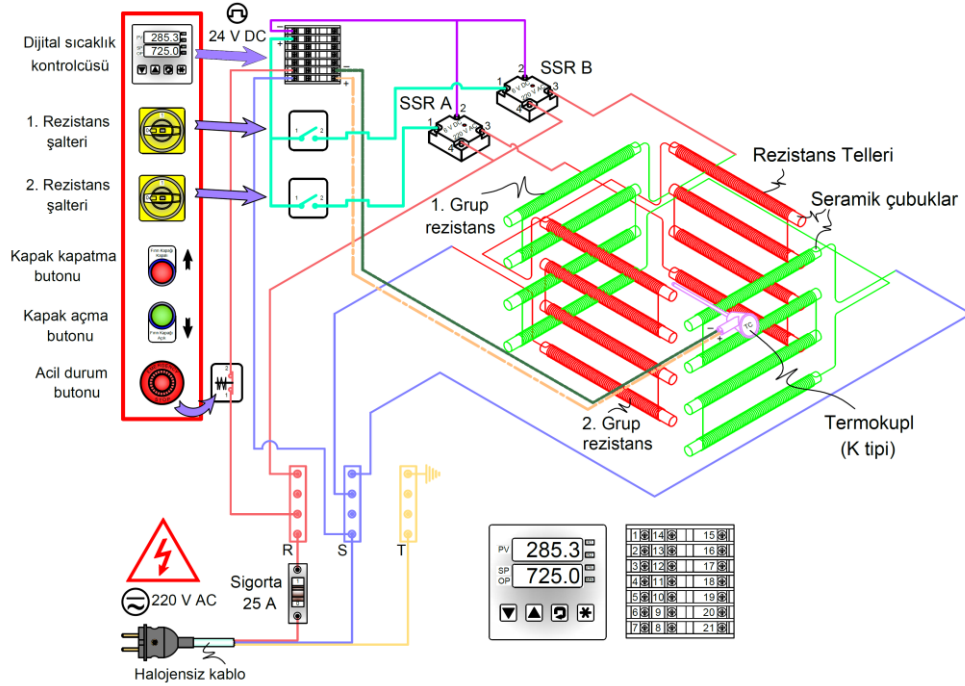


Şekil 5. Ergitme fırını; a) Rezistans yerleşim blokları ve rezistanslar, b) İzalasyon tuğla işlemleri tamamlanmış "L" profil kaynaklı ergitme fırını iç haznesi

Rezistanslar seramik yüzük ve klemens kullanılarak elektrik bağlantısına hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra ergitme fırını dış muhafaza haznesi içerisine yerleştirilmiştir. Devamında taşıyıcı gövde üzerindeki yerine monte edilerek yalıtım işlemleri ile elektrik bağlantıları tamamlanmıştır (Şekil 6). Elektrik bağlantı şeması Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Ergitme fırını; a),b) Rezistans klemens bağlantı şekli, c),d) Dış muhafaza haznesi içine ve taşıyıcı gövdeye yerleşimi



Şekil 7. Ergitme fırını kontrol paneli ve rezistans elektrik bağlantı şeması

Ergitme fırını bünyesinde yer alan iki ayrı rezistans grubu ayrı ayrı veya aynı anda çalıştırılabilmektedir. Rezistans gruplarının ayrı ayrı kontrol edilmesi ile aşağıdaki avantajların elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunlar;

- ✓ Rezistans ömrünün uzatılması,
- ✓ Fırın iç haznesinin istenilen sıcaklık değerine güvenli (fazla akım çekmeden), ekonomik (tek rezistans çalışarak uzun sürede) çıkmasını sağlamak,
- ✓ Arzu edilen durumlarda ani sıcaklık artışının sağlanması amacıyla iki rezistansın birlikte çalıştırılabilmesi,
- ✓ Rezistans arızalarının fırın çalışma sürekliliğini engellememesi,

şeklinde dir.

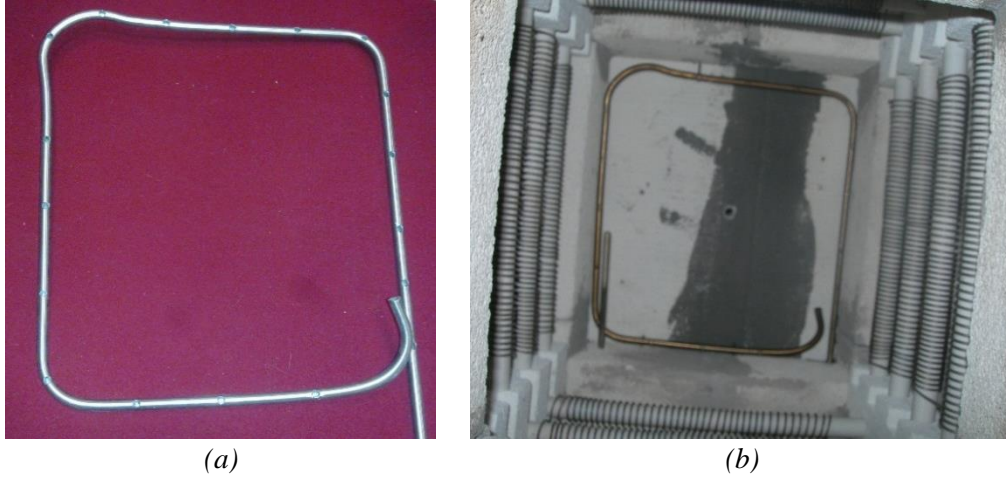
İmalatı tamamlanan ergitme fırını test amaçlı çalıştırıldığında fırın iç sıcaklığının 1200°C'ye çıkabildiği ve 24 saat süre boyunca dış kaplama sıcaklığının 30~40°C aralığında olduğu tespit edilmiştir [10].

2.1.3. Koruyucu atmosfer oluşturma ekipmanları (Protective atmospheric forming equipment):

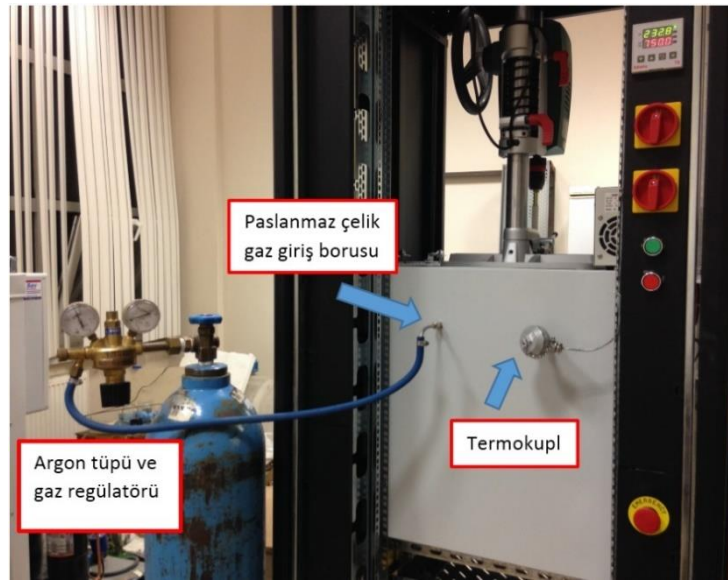
Alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda oksijen başta olmak üzere bulunduğu ortamda yer alan gazlara afinitesi oldukça yüksektir. Ergitilerek üretilmelerinde, yapı içerisinde arzu edilemeyen oksit bileşikleri ($MgAl_2O_4$, Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , vb.) ve metal olmayan kalıntıların oluşumu oldukça sık karşılaşılan durumlardır. Ayrıca hem sıvı hem de katı alüminyum içerisinde çözünebilir gazlar da döküm sonrası yapı içerisinde gözenek oluşumunu arttırmaktadır. Arzu edilmeyen bu inklüzyonların giderilmesinde bazı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar; ergiyik içerisine flakslama işlemi ve asal gaz ortamında ergitme işleminin gerçekleştirilmesine dayanır. Flakslama, inorganik tuz bileşiklerinin kullanıldığı kimyasal bir işlemdir. Alüminyum alaşımları için kullanılan dört tip ana flaks türü: örtü flaksları, temizleme flaksları, cüruf yapıcı flakslar ve inceltici flakslardır. Asal gaz ortamlarında gerçekleştirilen ergitme işlemlerinde genelde argon (Ar) ve azot (N_2) gazları kullanılmaktadır. Asal gaz olarak çoğu zaman en ağır gaz olması sebebiyle argon gazı tercih edilir. Bulunduğu ortama çökerek diğer gazları ortamdaki uzaklaştırır. Böylelikle istenmeyen reaksiyonların oluşumunu en aza indirir [18–20].

Ergitme fırınında koruyucu atmosfer ortamının sağlanması için argon gazı kullanılmıştır. Argon gazı ergitme fırınının üst kısmına yerleştirilen iç çapı 5 mm olan paslanmaz çelik boru ile ortama taşınması sağlanmıştır (Şekil 8). Paslanmaz çelik boru ergitme haznesi formuna benzer bükülmüş ve üzerine 4 mm

çapında 30~35 mm aralıklarla delikler delinmiştir. Tüp ve fırın ara bağlantılarında plastik hortum, paslanmaz çelik rekor ve dirsekler ile argon gazına uygun gaz regülatörü kullanılmıştır (Şekil 9).



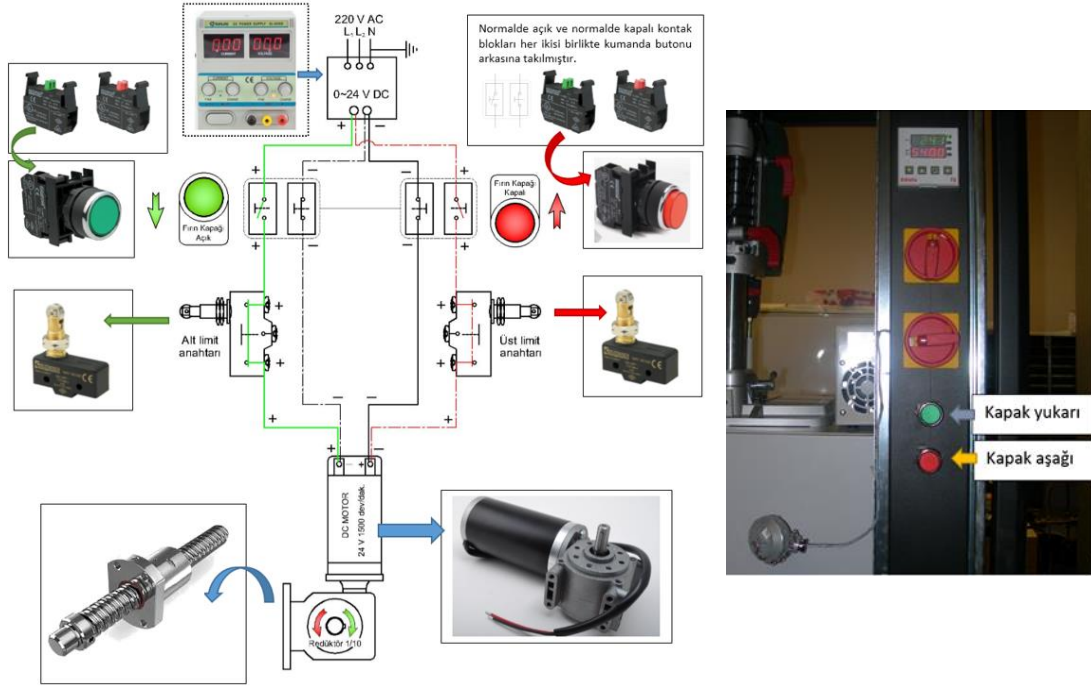
Şekil 8. a) Koruyucu atmosfer ortamı oluşturmada kullanılan paslanmaz çelik boru, b) Paslanmaz çelik boru fırın içi yerleşimi ve konumu



Şekil 9. Koruyucu atmosfer oluşturmada kullanılan bileşenler

2.1.4. Asansörlü pota yükleme/boşaltma ünitesi (Lift crucible loading / Unloading unit):

Kompozit malzeme üretiminde, ergimiş metal içerisine takviye elemanlarının ilave işleminden sonra karışım kalıp içerisine dökülerek nihai ürün elde edilmektedir. Bu döküm işleminde ergimiş haldeki karışımın sıcaklığının düşmemesi ve hava ile temas ederek istenmeyen reaksiyonların oluşmaması açısından, potanın kolay ve hızlı bir şekilde alınarak döküm işleminin gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle kompozit malzeme üretim sistemi, döküm işleminin kolayca gerçekleştirilebilmesi amacıyla, elektrikli asansör sistemi ile çalışan kapak ve mekanizmalarla, potayı fırın alt kısmından kolayca tahliye edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ergitme fırını alt kısmında, potanın fırın içine/dışına hareketleri ile ilgili mekanik-elektrik bileşenlerden oluşan bir asansör sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Elektrik bağlantı şeması ve yapı bileşenleri ile ilgili görseller Şekil 10'da yer almaktadır.



Şekil 10. Asansör sistemi elektrik bağlantı şeması ve yapı bileşenleri

2.1.5. Karıştırma ünitesi tasarım ve imalatı (Design and manufacturing of mixing unit):

Ergimiş metal karıştırma yöntemiyle parçacık takviyeli kompozit malzeme üretiminde en önemli etkenlerden biri de homojen takviye fazı dağılımının elde edilmesidir. Homojen dağılımın eldesi üzerinde, matris-takviye fazı ıslatılabilirlik özellikleri, karıştırma işleminde kullanılan karıştırıcı formu, karıştırma işleminin şekli ile diğer üretim parametreleri (sıcaklık, koruyucu atmosfer özellikleri, vd.) etkilidir. Karıştırma sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşturulmuştur. Bunlar;

- 1) Karıştırıcının, dönme ve aşağı/yukarı hareketinin gerçekleştirilmesini sağlayan matkap tezgahı,
- 2) Karıştırıcı ve bağlantı mili,

şeklindedir.

Matkap Tezgahı (Drill Machine):

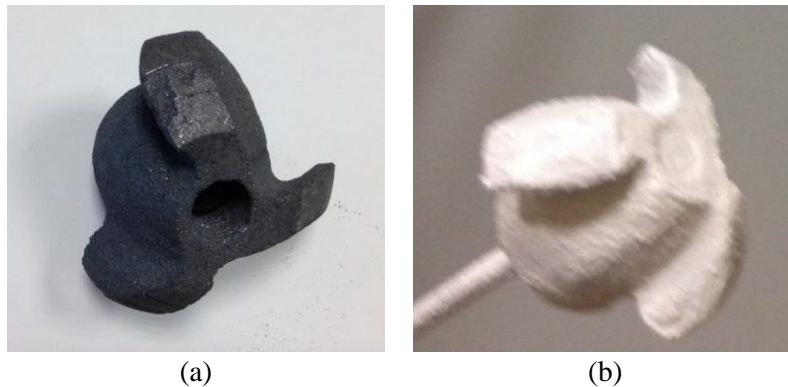
Karıştırma işleminde, “BOSCH PBD 40” marka masa üstü sütunlu matkap tezgahı kullanılmıştır. Cihaz, karıştırıcının istenilen devir sayısında dönmesini ve istenilen mesafeler arasında aşağı/yukarı hareket etmesini sağlamaktadır. Dijital göstergesi ve üzerinde yer alan potansiyometre sayesinde istenilen devir sayısı rahatlıkla ayarlanabilmektedir. Ayrıca, karıştırıcının konumu ve ne kadar mesafede hareket edebileceği de dijital ekran ve mekanik kısıtlayıcı ile kontrol edilebilmektedir. Bu özellik pota dip noktasından karıştırıcının ne kadar yüksekte karıştırma işlemini gerçekleştireceğini belirlemeye olanak sağlamaktadır. Hız ayarı iki ayrı vites seçeneği ile 1. viteste 200~850 rpm, 2. viteste ise 600~2500 rpm aralığında istenilen değere ayarlanabilmektedir. Cihazla ilgili görsel ve teknik özellikleri Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 11. Karıştırma işlemi için kullanılan matkap tezgahı ve teknik özellikleri

Karıştırıcı (Mixer):

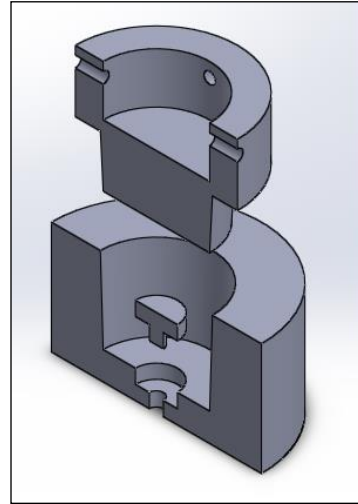
Ergimiş metal karıştırma yönteminde karıştırma işleminde kullanılacak karıştırıcı, karıştırma işlemi süresince matris ve takviye fazına herhangi bir zarar vermemeli ve sıcaklık ile kuvvetler etkisinde dayanım özelliğini ve formunu koruyabilmelidir. Karıştırıcı, özellikle matris malzemesi ile reaksiyona girmemeli, matris tarafından kolayca ıslatılmamalıdır. Ergimiş metal karıştırma tekniği ile kompozit malzeme üretiminde karıştırıcının malzemesi, formu ve dayanım özellikleri önem taşımaktadır. Karıştırıcının imalinde pota malzemesi olarak kullanılan preslenmiş SiC/Grafit malzeme kullanılmıştır. Karıştırıcı formu, yaklaşık 60° açılı 3 kanatlı olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Karıştırıcının aşınma direncini arttırmak ve soğuma işlemi esnasında hava ile temasının engellenip pullanarak deforme olmasını önlemek amacıyla yüzeyi “silika + α -Al₂O₃ (~1 μ m)” karışımı ile kaplanmıştır. Kaplanmış karıştırıcı, 200°C’de 2 saat tavllanmış ve fırın içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Karıştırıcının ilk formu ile yüzey kaplama ve tavlama işlemi sonrasındaki görüntüleri Şekil 12’de sunulmuştur.



Şekil 12. Karıştırıcı; a) İmalat sonrası ilk form, b) Yüzeyi kaplanmış ve tavllanmış kullanıma hazır form

2.1.6. Sıkıştırılmalı döküm kalıbı ve hidrolik pres tezgahı (Compression casting mold and hydraulic press machine):

Üretilen MMK'da gözenekli yapıyı en aza indirmek amacıyla sıkıştırılmalı döküm tekniği kullanılmıştır. Sıkıştırılmalı döküm işlemi için bir adet TS EN ISO 4957'ye göre "X40CrMoV5-1" sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş silindirik formlu kalıp kullanılmıştır. Sıvı haldeki kompozitin kalıp içerisine dökülmesinden sonra sıkıştırılması için de en yüksek basma kuvveti 15 Ton olan hidrolik pres kullanılmıştır. Kalıp ve hidrolik pres ile ilgili görseller Şekil 13'te sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 13. Sıkıştırılmalı döküm işleminde kullanılan ekipmanlar; a) Kalıp (kesit), b) Hidrolik pres

2.2. Matris ve Takviye Elemanı (Matrix and Reinforcement Material)

MMK malzeme üretiminde matris malzemesi olarak T4 ısıl işlem uygulanabilen, korozyon direnci ve yorulma dayanımı yüksek, kaynak kabiliyeti iyi olan AA 6060 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA 6060 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AA 6060 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Element	Al	Si	Mg	Fe	Ga	Zn
ort. %	98,28	0,786	0,4770	0,197	0,131	0,129

MMK üretiminde takviye elemanı olarak saflık derecesi %98, özgül ağırlığı $3,22 \text{ g/cm}^3$ olan ortalama tane boyutu 200 mesh boyutlarında SiC parçacıkları kullanılmıştır. Kullanılan SiC oda sıcaklığında katı halde bulunmaktadır ve koyu gri renktedir.

2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi (Production of Metal Matrix Composites)

Bu çalışmada MMK imalatını gerçekleştirebilmek için üretim sistemi imal edilmiştir. İmal edilen üretim sisteminin çalışma verimliliğini belirlemek amacıyla; ergimiş metal karıştırma tekniği ile basınç altında döküm yöntemi kullanılarak bir adet takviyesiz AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ve iki adet SiC takviyeli AA 6060 MMK imal edilmiştir. İmal edilen MMK'larda SiC takviye elemanı oranı hacimce sırasıyla %7 ve %10 olarak belirlenmiştir.

Parçacık takviyeli MMK üretmek amacıyla kullanılan potanın içerisine belirlenen miktarda alüminyum eklenmiştir. Koruyucu atmosfer oluşturmak amacıyla ergitme haznesi içerisine argon gazı verilmiştir. MMK malzemenin dış ortamdan etkilenmesi en aza indirilmiştir. Ergitme fırınının sıcaklığı 750°C

ayarlanmış ve matrisin ergimesi için bu sıcaklık değerinde yaklaşık 1,5 saat bekletilmiştir. Alüminyum ergidikten sonra karıştırıcı açılmıştır. Karıştırıcının hızı, girdap oluşturmak amacıyla, başlangıç devri 350 rpm olarak ayarlanmıştır. SiC takviye elemanları alüminyum folyo içerisine yaklaşık 5 gr'lık paketler halinde sarılmıştır. Paketler ergitme fırını üstünde yer alan delik çapı 11 mm olan seramik borudan ergitme potası içerisine yaklaşık 5 dakika aralıkla atılmıştır. Karışımın homojen dağılımı için karıştırıcı belli aralıklarda aşağı yukarı hareket ettirilmiştir. Paket halinde takviye elemanlarının pota içerisine atılma işlemi tamamlandıktan sonra yaklaşık 15 dakika karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son karıştırma işleminde, homojen parçacık dağılımının elde edilmesi amacıyla karıştırıcı devri 500 rpm değerine çıkarılmıştır.

SiC takviyeli AA 6060 alüminyum alaşım matrisli sıvı haldeki kompozitin, akışkanlığını artırarak dökümünü kolaylaştırmak amacıyla; döküm işlemine geçmeden önce ergitme fırınının sıcaklığı 800°C'ye çıkartılmıştır. Döküm işlemi için pota asansör vasıtası ile ergitme fırınının altına indirilmiştir. Potanın içerisindeki MMK yaklaşık 250°C sıcaklığa ısıtılan kalıbın içerisine dökülmüştür. Kalıbın içerisindeki MMK, 15 tonluk presle 2 MPa basma kuvvetiyle sıkıştırılarak üretimi tamamlanmıştır.

Üretilen MMK'ler ile AA 6060 alüminyum alaşım malzemesinin özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla takviye elemanı olmayan AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi de benzer koşullarda üretilmiştir. AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ergitildikten sonra kalıba dökülmüş ve MMK malzemelere benzer oranda basınç uygulanmıştır.

2.4. Mikroyapı İncelemesi, Yoğunluk, Gözenek ve Sertlik Ölçümünde Kullanılan Cihazlar (Micro structure Inspection, Density, Porosity and Hardness Measurement Devices)

Metalografik numune hazırlama işlemleri tamamlanan malzemelerin mikroyapı fotoğrafları "Nikon" marka optik mikroskopta çekilmiş ve "Clemex Yazılımı" ile bilgisayara aktarılmıştır. Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde 50X, 100X, 200X ve 500X büyütme ölçeği kullanılmıştır.

Üretilen MMK'ların deneysel yoğunluk miktarlarının ölçümünde, 1 mg ölçüm duyarlı mekanik terazi kullanılmıştır. Gözenek miktarının belirlenmesinde, deneysel yoğunluk değerinden teorik olarak hesaplanan yoğunluk değeri çıkartılarak gözeneklilik yüzde oran değeri tespit edilmiştir. Teorik yoğunluk ve gözenek miktarı hesaplarında Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'te verilen formüller kullanılmıştır.

$$\delta_T = [\text{Matris (Al) \% hacim oranı} \times \delta_{AA6060}] + [\text{Takviye el. (SiC) \% hacim oranı} \times \delta_{SiC}] \quad 2.4$$

Burada; δ_T : Teorik yoğunluk (g/cm³), δ_{AA6060} : AA 6060 alüminyum alaşımının özgül ağırlık değeri, δ_{SiC} : SiC takviye elemanının özgül ağırlık değerini belirtmektedir.

$$\text{Gözenek (\%)} = [(\delta_D - \delta_T) / \delta_D] \times 100 \quad 2.5$$

Burada; δ_D : Deneysel yoğunluk (g/cm³), δ_T : Teorik yoğunluk (g/cm³) anlamındadır.

Üretimi gerçekleştirilen matris malzemesi ile takviye oranı %7 ve %10 olan SiC takviyeli AA 6060 alüminyum alaşım MMK'nın sertlik ölçümü için "ADİO AHT 350 Leeb Hardness Tester" marka cihaz kullanılmıştır. Sertlik ölçüm deneyinde "Brinell" sertlik ölçüm metodu tercih edilmiştir. Her bir numunede 5 kez ölçüm yapılmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Üretim Sistemi Performansı İle İlgili Sonuçlar (Results of Production System Performance)

Üretim sistemi ilk olarak alüminyum alaşım matris malzemesini ergitebilme kabiliyeti incelenmiştir. Üretim sistemi performans testlerinin göstergeleri olarak üretilen malzemelerin (AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ve iki adet SiC takviyeli AA 6060 MMK), mikroyapı, sertlik, yoğunluk ve yapı içerisindeki gözenek miktarı incelenmiştir.

Hafif metal matrisli, parçacık takviyeli kompozit malzeme üretmek için geliştirilen üretim sisteminin, başta alüminyum olmak üzere hafif metalleri (ergime sıcaklığı 1200°C'ye kadar) ergitebildiği gözlenmiştir.

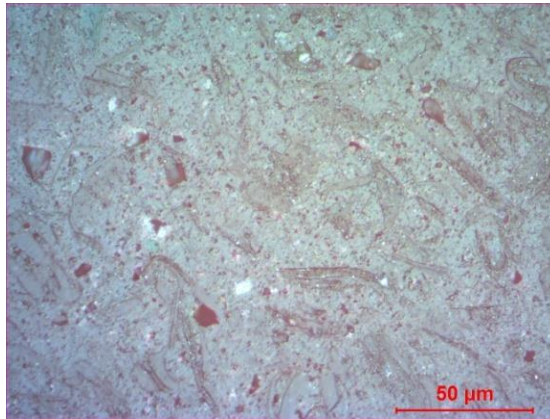
Tasarım ve imalat süreçleri tamamlanarak performans testleri gerçekleştirilen üretim sisteminin, literatürdeki benzerlerine kıyasla farklılığı/üstünlüğü aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Bunlar;

- MMK mazleme üretim sistemi tamamen kapalı iç haznesi sayesinde, koruyucu atmosfer ortamının sağlanmasını kolaylaştırmıştır,
- Karıştırma işleminde kullanılan matkap tezgahının ergitme fırını üzerine konumlandırılmasıyla, ergitme fırını içerisinde ergitme fırınının üst kapağı bile açılmadan ergimiş metalin karıştırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde yer alan üretim sistemlerinin bir çoğu ergitme fırını/potayı karıştırıcı sistem/makina altına taşıyarak veya fırın üst kapağı tamamen açılarak karıştırma işlemini gerçekleştirebilmektedir [6, 7, 9, 11–14, 18].
- Ergitme potasının asansör sistemli alt kapak vasıtası ile hızlı ve güvenli bir şekilde fırın dışına alınması ve döküm işlemine başlanması kolaydır,
- Ergitme işleminde sıcaklık artış hızı iki ayrı rezistans grubunun farklı şalterle kontrol edilmesi ile değiştirilebilmektedir. Bu durum hem enerji tasarrufu hemde sıcaklık kontrolünün sağlanması açısından önem arz etmektedir. Ayrıca rezistans tel gruplarından herhangi birisinin arızalanması durumunda üretime diğer rezistans grubu ile devam edilebilmektedir,
- Karıştırıcı milinin matkap tezgahının mandrenine takılmasında, daha düşük ısı iletim katsayılı malzeme (Al_2O_3 seramik boru) kullanılarak, metal-metal teması engellenmiştir. Geliştirilen seramik boru bağlantısı sayesinde, matkap tezgahı mandren ve iş milinin sıcaklık değeri en aza (yaklaşık $35^{\circ}C$) indirilmiştir,
- Takviye elemanlarının ilave şekli kolay, etkin ve operator açısından emniyetlidir,

şeklinde dir.

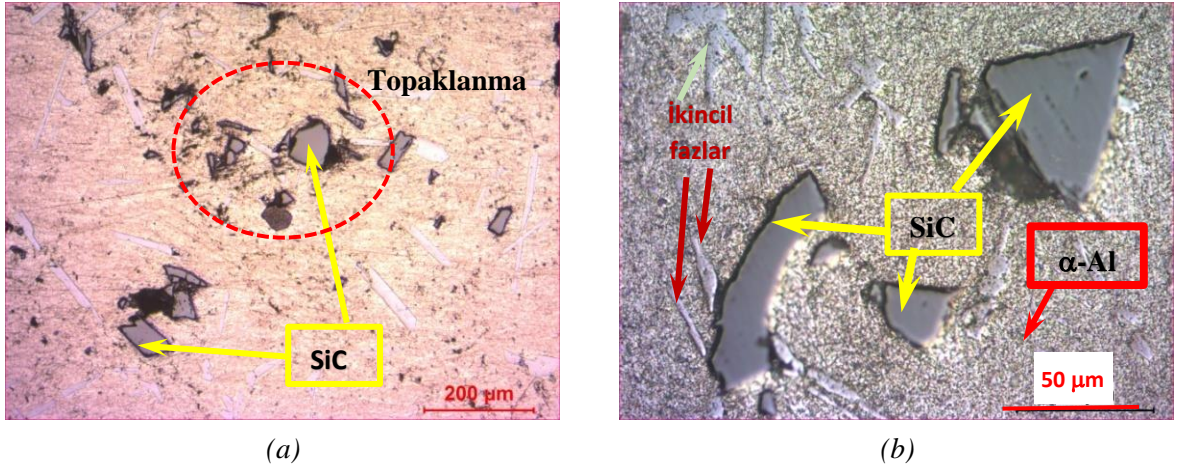
3.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları (Microstructure Review Results)

Metalografik incelemeler, üretimi gerçekleştirilen iki adet kompozit ve bir adet AA 6060 alüminyum alaşımı malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemelerde; MMK içerisindeki parçacık dağılımı, gözeneklilik, kısmi bir bilgi elde edilecek olsa da takviye elemanı ile matris arası arayüzey bağı incelenmiştir. Metalografik incelemelerle elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 14 ile Şekil 16 arasında sunulmuştur.



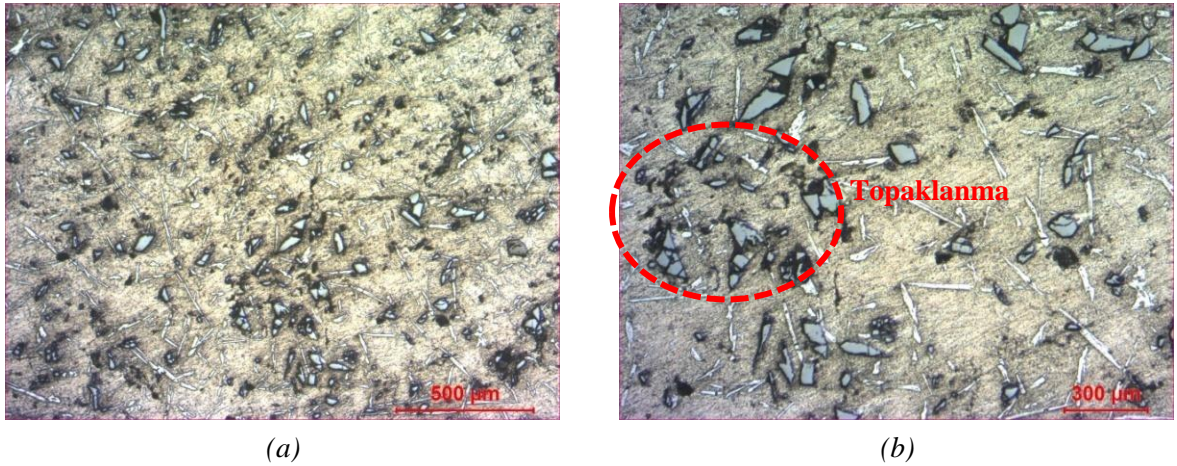
Şekil 14. AA 6060 alüminyum alaşım matrisin mikroyapı görüntüsü 200X

Şekil 14’de AA 6060 alüminyum alaşım matrisin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; α -alüminyum fazı ve ikincil silisyum dentritik yapıları gözlenmiştir.



Şekil 15. Hacimce %7 SiC takviyeli kompozit mikro yapı görüntüleri; a) 200X, b) 500X

Şekil 15 (a) ve (b)'deki %7 SiC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; kısmen homojen olduğu gözlenmiştir. Bazı bölgelerde topaklanmanın meydana geldiği görülmüş olmasına rağmen takviye elemanlarının aralarında boşluklar mevcut olduğu saptanmıştır.



Şekil 16. Hacimce %10 SiC takviyeli kompozit mikro yapı görüntüleri; a) 50X, b) 100X

Şekil 16 (a) ve (b)'deki %10 SiC takviyeli kompozitin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde; kısmen homojen olduğu ve bazı yerlerde topaklanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. AA 6060 alüminyum alaşımlı metal matrisin takviye elemanını tamamen sardığı belirlenmiştir. Buradan da; AA 6060 alüminyum alaşımı metal matrisin takviye elemanını iyi ıslatabildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca mikroyapı görüntülerinden imalat işlemlerinde kullanılan karıştırıcı ve karıştırma işleminde kullanılan devir sayısı ile karıştırıcının yukarı/aşağı hareketinin, parçacıkların nispeten homojen dağılımı için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Karıştırmalı döküm tekniğinde matris içinde takviye elemanının homojen dağılımını sağlamak oldukça zordur. MMK'nın bazı bölgelerinde SiC takviye elemanının daha yoğun olduğu görülmektedir. Parçacıkların matris içinde bir bölgede yoğunlaşmasının sebebi; MMK'nın katılaşma sırasında katı halde bulunan takviye elemanını irileşen dentritlerden katı sıvı faza yönelmeye zorlamasıdır [2].

3.3. Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçüm Sonuçları (Density and Porosity Measurement Results)

İmalatı gerçekleştirilen deney numunelerinin yoğunluk değerinin incelenmesinin amacı, malzemenin yoğunluk miktarına bağlı olarak gösterdiği dayanım karakteristiklerini saptamaktır. Diğer bir amacı ise; MMK'ların seçilen imalat metodunun sebep olduğu gözenek miktarını belirlemektir. Tablo 2'de imalatı gerçekleştirilen malzemelerin yoğunlukları ve gözenek miktarları gösterilmiştir.

Tablo 2. İmal edilen malzemelerin yoğunluk ve % gözenek miktarları

MMK Matris ve Takviye Elemanı Yoğunluk Değeri (δ), g/cm ³		Deneysel Yoğunluk (δ_D), g/cm ³	Teorik Yoğunluk (δ_T), g/cm ³	Yoğunluk Farkı ($\delta_D - \delta_T$), g/cm ³	Gözenek miktarı $\left[\left(\frac{\delta_D - \delta_T}{\delta_D} \right) \times 100 \right]$, %
AA 6060	SiC				
2,682	3,22				
Malzemelerin Hacim Oranları (%)					
%100 AA 6060		2,674	2,682	0,008	0,30
%93 AA 6060 + %7 SiC		2,707	2,719	0,012	0,44
%90 AA 6060 + %10 SiC		2,708	2,736	0,028	1,02

Tablo 2’de takviye elemanı hacim oranının artmasına bağlı olarak malzemenin yoğunluğu ve gözenek miktarının arttığı görülmektedir. Takviye elemanı (SiC) yoğunluğunun, matrisin yoğunluğundan fazla olması, ağırlıkça takviye oranlarının artmasıyla, kompozit malzemelerin yoğunluklarını da arttırmıştır. Gözenek miktarındaki artış, artan takviye elemanı hacim oranına bağlı olarak, yapı içerisindeki topaklanmış takviye elemanları etrafında oluşan gaz boşluklarının varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Döküm yoluyla üretim tekniğinde gözenekli yapı oluşumu kaçınılmazdır. Üretilen malzemelerin gözenek miktarı, geleneksel basınçsız döküm yöntemiyle üretilen malzemelerle (en az %2) kıyaslandığında, nispeten düşük değerlerdedir. Bunun en büyük nedeni döküm işleminin, hidrolik pres kullanılarak sıkıştırılmalı döküm tekniği ile gerçekleştirilmesidir [12]. Karıştırmalı döküm yöntemi ile imalatı gerçekleştirilen malzemelerde gözenek meydana gelmesinin nedenlerinden biri de alüminyum alaşımlarının sıvı halde ortamda bulunan gazları çözmesidir. Özellikle hidrojen gazı sıvı alüminyumda yaklaşık 1,4 ppm değerinde çözünebilmektedir [20]. MMK’ların döküm sırasında hava ile irtibatla bulunması ve döküm zamanı sıvı alüminyum içerisinde çözünen gaz haldeki elementleri arttırmaktadır. Bu durum katılma esnasında gözenekli yapı oluşmasına neden olmaktadır. MMK içinde gözenek miktarının yükselmesi, malzemenin mekanik karakteristiğini olumsuz yönde etkilenmektedir.

3.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları (Hardness Measurement Results)

Matris malzemesi ve kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçları Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. İmalatı gerçekleştirilen malzemelerin sertlik değerleri

Deney Numunelerinin Sertlik Değerleri		
No	Malzeme içeriği, hacim oranı %	Sertlik Değeri, BHN
1.	%100 AA 6060	21
2.	%93 AA 6060 + %7 SiC	24
3.	%90 AA 6060 + %10 SiC	26

Tablo 3’te görüldüğü üzere; MMK’nın sertlik değerleri takviyesiz matris alüminyum alaşımına göre daha yüksektir. Numuneler arası yapılan karşılaştırmaya göre; takviye elemanının MMK içindeki hacimce yüzde oranı arttıkça, sertlik değerinin arttığı anlaşılmaktadır. Literatürde incelenen bazı çalışmalarda MMK’ların takviye oranı arttıkça malzemenin sertliğinin arttığı belirtilmiştir [18, 21–22].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hafif metal matrisli parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimine yönelik üretim sisteminin tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretim sistemi ile ilgili sonuçlar;

- Üretim sistemi ergimiş metal karıştırma tekniği ile kompozit malzeme üretiminde gerekli tüm bileşenleri (“Ergitme fırını”, “Kontrol ünitesi”, “Karıştırma ünitesi”, “Koruyucu atmosfer bileşenleri” ve “Asansör sistemli pota yükleme/boşaltma ünitesi”) bünyesinde barındırmaktadır,
- Ergitme fırını en yüksek 1200°C sıcaklığa çıkabilmekte ve koruyucu atmosfer ile kullanıma uygundur,
- Ayır ayrı çalıştırılabilen iki rezistans grubu ile sıcaklık artış hızı ve tükettiği enerji kontrol edilebilir,
- Üretim sistemiyle, ergimiş metal karıştırma tekniğiyle parçacık, partikül, kısa fiber ve kılcal kristal formulu takviye elemanları kullanılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilir,

- Asansör sistemli pota alma sistemi sayesinde döküm işlemine geçiş güvenli ve hızlıdır,
- Karıştırma sistemi ergitme fırını üzerinde konumludur. İstenildiği anda karıştırma işlemine hızlıca geçiş yapılabilir,

şeklindedir.

Üretim sistemi kullanılarak hacimce %7 ve %10 SiC takviyeli MMK malzemelerin üretiminin başarılı olduğu işlem parametreleri;

- Ergitme fırını sıcaklık değerinin 750°C'ye ayarlanması,
- Karıştırıcı devri tekviye elemanı ilave ederken; 350 rpm, döküm işlemi öncesinde homojen dağılım elde etmek amacıyla 15 dakika süre ve 500 rpm olması,
- Karıştırma işleminde karıştırıcının dönme eksenini boyunca aşağı/yukarı hareket ettirilmesi,
- Koruyucu atmosfer ortamının ergime işlemi başlamadan sıcaklık değeri 350°C'ye ulaştığında başlatılarak oluşturulması ve döküm işlemine kadar sürdürülmesi gerektiği,
- Takviye elemanının alüminyum folyo içerisine sarılmış 5 gr'lık paketler halinde 5 dakika aralıkla ilave edilmesi,
- Döküm işlemi öncesinde sıcaklığın 850°C'ye çıkarılması,
- Döküm işleminin yapılacağı çelik kalıbın 350°C'ye çıkarılması ve hidrolik pres altında 2 MPa basınçta sıkıştırılması,

şeklindedir.

İmal edilen MMK'larda aşağıdaki bulgular tespit edilmiştir. Bu bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Mikroyapı incelemelerinde, tüm kompozit numunelerde takviye elemanı dağılımının nispeten homojen olduğu görülmüştür.
- Takviye elemanı oranının artması, malzemelerin yoğunluk ve gözenekliliğini arttırmıştır. Üretilen kompozitlerde en yüksek gözeneklilik miktarı, %10 takviyeli kompozitte %1,02 değerinde tespit edilmiştir.
- Takviye hacim oranının artmasıyla malzemenin sertliği de artmıştır. Hacimce %10 SiC takviyeli numune, 26 BHN değerle en yüksek sertliğe sahip malzemedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chaudhury, S. K., Singh, A. K., Sivaramakrishnan, C. S., and Panigrahi, S. C., "Wear and Friction Behavior of Spray Formed and Stir Cast Al-2Mg-11TiO₂ Composites", *Wear*, 258 (5-6): 759-767 (2005).
- [2] Çiftçi, İ., "Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- [3] James, S. J., Venkatesan, K., Kuppan, P., and Ramanujam, R., "Comparative Study of Composites Reinforced With SiC and TiB₂", *Procedia Engineering*, 97: 1012-1017 (2014).
- [4] Gökmeşe, H. and Karadağ, H. B., "Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (2): 385-398 (2018).
- [5] Pul, M. and Şeker, U., "Vakumlu İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al-MgO Kompozitlerin Tornalanmak Suretiyle İşlenmesinde Farklı Kesici Takımların Aşınma Davranışlarının Değerlendirilmesi", *Journal of Engineering and Natural Sciences*, (Sigma 28): 179-187 (2010).

- [6] Kumar, A., Lal, S., and Kumar, S., "Fabrication and Characterization of A359/Al₂O₃ Metal Matrix Composite Using Electromagnetic Stir Casting Method", *Journal of Materials Research and Technology*, 2 (3): 250–254 (2013).
- [7] Bains, P. S., Sidhu, S. S., and Payal, H. S., "Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review", *Materials and Manufacturing Processes*, 31 (5): 553–573 (2016).
- [8] Ragab, K. A., Abdel-Karim, R., Farag, S., El-Raghy, S. M., and Ahmed, H. A., "Influence of SiC, SiO₂ and Graphite on Corrosive Wear of Bronze Composites Subjected to Acid Rain", *Tribology International*, 43 (3): 594–601 (2010).
- [9] Nishida, Y., "Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling", *Springer Science & Business Media*, 212 (2013).
- [10] Kayabaşı, İ., "Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sistemi İmalatı ve Performansının İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*, (2016).
- [11] Suresh, S., "Fundamentals of Metal-Matrix Composites", *Butterworth-Heinemann*, ISBN: 9780080523712, 320–353 (2013).
- [12] Sur, G., "Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi", *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara*, (2008).
- [13] Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M. S. J., "Metal Matrix Composites: Production By The Stir Casting Method", *Journal Of Materials Processing Technology*, 92:931–937 (1999).
- [14] Seo, Y.H. and Kang, C.G., "The effect Of Applied Pressure On Particle-Dispersion Characteristics and Mechanical Properties in Melt-Stirring Squeeze-Cast SiCp/Al Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 55 (3): 370–379 (1995).
- [15] Yue, T. M. and Chadwick, G. A., "Squeeze Casting of Light Alloys and Their Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 58 (2): 302–307 (1996).
- [16] Dhanashekar, M. and Kumar, V. S. S., "Squeeze Casting of Aluminium Metal Matrix Composites-An Overview", *Procedia Engineering*, 97: 412–420 (2014).
- [17] Singh, M., Rana, R. S., Purohit, R., and Krishnkant, S., "Development and Analysis of Al-Matrix Nano Composites Fabricated by Ultrasonic Assisted Squeeze Casting Process", *Materials Today: Proceedings*, 2 (4): 3697–3703 (2015).
- [18] Sahin, Y., "Preparation and Some Properties of SiC Particle Reinforced Aluminium Alloy Composites", *Materials & Design*, 24 (8): 671–679 (2003).
- [19] Karbalaei Akbari, M., Baharvandi, H. R. and Shirvanimoghaddam, K., "Tensile and Fracture Behavior of Nano/Micro TiB₂ Particle Reinforced Casting A356 Aluminum Alloy Composites", *Materials & Design* (1980-2015), 66 (Part A): 150–161 (2015).
- [20] Mehmet Güler, "Alüminyum Alaşımlarında İnküzyon Çeşitleri ve Önleyici Faaliyetler", *Metalurji Dergisi*, (184): 36–42 (2017).
- [21] Bharath, V., Nagaral, M., Auradi, V., and Kori, S. A., "Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by Stir Casting and Evaluation of Mechanical and Wear Properties", *Procedia Materials Science*, 6: 1658–1667 (2014).
- [22] Balasubramanian, I. and Maheswaran, R., "Effect of Inclusion of SiC Particulates on The Mechanical Resistance Behaviour of Stir-Cast AA6063/SiC Composites", *Materials & Design* (1980-2015), 65 (Supplement C): 511–520 (2015).



Mersin / Türkiye için Ölçülen Global Güneş Işınımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi ve Yaygın Işınım Modelleri ile Karşılaştırılması

Gökhan ARSLAN^{1,*}, Burhan BAYHAN², Kaan YAMAN¹

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 33343, Yenişehir/MERSİN

²Selçuk Üniversitesi, Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu Cihanbeyli / KONYA

Öz

Bu çalışmada, Nisan 2017 – Mart 2018 tarihleri aralığında Mersin için ölçülen günlük toplam global güneş ışınım değerlerinin yapay sinir ağı kullanılarak modellenmesi yapılmıştır ve literatürde bulunan yaygın modellerin günlük toplam global güneş ışınım değerlerini tahmin etme performansları incelenmiştir. Günlük ortalama hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı, güneşlenme süresi ve bulut kapallığı verileri, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup güneş ışınım değerleri ise piranometre ile ölçülmüştür. Sonuç olarak, incelenen modeller içerisinde en iyi tahmin performansını belirlilik katsayısı (R^2) 0,83 olan Model 37 (Zhang ve Huang) göstermiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 29/04/2018

Düzeltilme: 11/07/2018

Kabul: 10/01/2019

Anahtar Kelimeler

Global güneş ışınımının tahmini
Güneş ışınım modeli
Yapay Sinir Ağları
Mersin

Keywords

Prediction of global solar radiation
Solar radiation model
Artificial Neural Networks
Mersin

Estimation of Measured Global Solar Radiation by Artificial Neural Networks for Mersin / Turkey and Comparison with Common Solar Radiation Models

Abstract

In this study, the daily total global solar radiation values measured for Mersin between April 2017 and March 2018 were modeled using artificial neural networks and the performance of estimating daily total global solar radiation values of the common models in the literature was investigated. Daily average air temperature, relative humidity, wind speed, sunshine duration, and cloud cover data are obtained from the Turkish State Meteorological Service and solar radiation values are measured with a pyranometer. As a result, Model 37 (Zhang and Huang) showed the best prediction performance among the models examined, with the coefficient of determination (R^2) being 0.83.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fosil yakıtların kısıtlı olması ve çevreye zarar vermesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını önemli hale getirmiştir [1]. Güneş, rüzgâr, jeotermal ve dalga enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının başlıcalarıdır. Güneş enerjisi bu kaynaklar arasında en yüksek potansiyele sahiptir. Günümüzdeki teknoloji güneş enerji potansiyelini ısıl prosese veya doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek insanoğlunun kullanımına olanak sağlamaktadır. Güneş enerjisinin bir diğer avantajı ise dünya çapında homojen dağılımıdır. Bu gerçeklere bağlı olarak, mühendisler sistemleri düzenli bir şekilde tasarlaması için güneş ışınımı şiddeti doğru bir şekilde tahmin etmelidir [2].

Belirli bir bölgedeki güneş enerjisi potansiyelini belirlemek amacıyla yapılan meteorolojik gözlemler, nitelikli insan gücü ve önemli ekonomik yatırımlar gerektirmektedir. Gözlem cihazlarının pahalı olması, cihazların bakım ve kalibrasyonlarının gerekli şekilde ve sıklıkta yapılamaması, verilerin iletiminde ve saklanmasında yaşanan problemler, deneyimli ve yeterli eleman olmaması gibi problemler, gözlem istasyonlarının kurulmasını ve işletimini olumsuz yönde etkilemektedir [3]. Güneş enerjili sistemlerin tasarımında büyük önem taşıyan güneş ışınım verilerinin ölçülmesi her zaman her bölge için mümkün

*İletişim yazarı, e-mail: garslan@mersin.edu.tr

değildir. Bu nedenle, güneş ışınım değerlerini tahmin etmek için yeni modellerin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Güneş ışınım değerleri birçok meteorolojik veya coğrafik parametrelere bağlı olduğundan çeşitli modeller elde etmek mümkündür. Bu çalışmada, güneş ışınımının literatürde bulunan modeller ve yapay sinir ağlarıyla (YSA) tahmin edilebilirliği ortaya konmuştur.

Güneş ışınımının tahmini ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Alsaad, Ürdün'ün Amman şehrinde 1983 – 1987 yılları arasındaki ölçülmüş yatay düzleme gelen saatlik global güneş ışınım verilerini incelemiştir. Aylık ortalama günlük güneş ışınım verilerini hesaplayarak bu verileri Amman için ortalama, maksimum ve minimum global güneş ışınımının her biriyle güneşlenme süreleri arasında geliştirdiği doğrusal ilişkilere uygulamıştır. Sonuç olarak, aylık ortalama günlük güneş ışınım değerlerini %6,6 - 9,6 arasındaki hata oranlarında tahmin etmiştir. Hatanın ortalaması ise %0,3'ü geçmemiştir [4]. Jain ve Jain, aylık ortalama günlük global güneş ışınımının doğrusal regresyon analizini sekiz Zambiya bölgesinin güneş ışınımı verileri ve en küçük kareler tekniği kullanarak gerçekleştirmişler ve global ışınımı %4 - 10 aralığındaki doğrulukla tahmin etmişlerdir [5]. Luhanga ve Andringa, global güneş ışınımı ile güneşlenme süresi arasında Angstrom tipi ilişkileri incelemiştir. Bu ilişkileri Gaborone, Botswana'daki Sebele Tarımsal Araştırma İstasyonu'nda kaydedilen güneş ışınımı verileri üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Amaçları Angstrom denklemindeki parametrelerin azaltılıp azaltılamayacağını Hay'ın [6] belirttiği (i) yer ve atmosfer arasındaki ışınımın çoklu yansımaları ve (ii) güneş ışınımı kaydedicinin performans özellikleri etkileriyle ortaya koymaktır. Sonuç olarak, bu etkilerin dahil edilmesiyle Botswana verileri için regresyon parametrelerindeki değerlerde azalmanın olmadığını görmüşlerdir [7]. Almorox ve Hontoria, İspanya'daki 16 meteorolojik istasyon için sadece bağlı güneşlenme süresini kullanarak global güneş ışınımını tahmin etmişler ve bunun için Angstrom–Prescott doğrusal regresyon ve değiştirilmiş fonksiyonlarını (ikinci derece, üçüncü derece, logaritmik ve üstel) kullanmışlardır. Tüm modeller iyi tahmin sonucu vermekle beraber üçüncü dereceden olan fonksiyon diğer modellere göre daha iyi sonuç vermiştir [8]. Öztürk, Isparta ili için yatay düzleme gelen günlük global güneş ışınımını tahmin etmek için literatürde bulunan 46 modeli incelemiş ve 4 model geliştirmiştir [9]. Bahel ve arkadaşları, Zahran için güneşlenme süresini ölçüp aylık ortalama günlük global güneş ışınımı ve güneşlenme süresi arasında doğrusal ilişki kurmuşlardır. Ölçüm ve tahmin değerleri arasındaki uyumun %4'ten daha iyi olduğunu bulmuşlardır [10]. Louche ve arkadaşları, Akdeniz bölgesi için direkt normal ve global yatay ışınım arasında ilişki kurmuşlardır. Bu ilişkileri saatlik, günlük ve aylık ortalama verileri için geliştirmişlerdir [11]. Akınoğlu ve Ecevit, literatürde bulunan güneşlenme temelli tahmin yapan beş modelin ve kendi geliştirdikleri ikinci dereceden modelin tahmin performansını incelemiştir [12]. Ogelman ve arkadaşları, Ankara ve Adana'daki üç yıllık güneş ışınım verisini kullanarak günlük global güneş ışınımının atmosfer dışı global güneş ışınımına oranı (Q/Q_0) ile güneşlenme süresinin gün uzunluğuna oranı (t/t_0) arasında ilişki kurarak model oluşturmuşlardır. Modeldeki bağlı hata %5'ten daha az çıkmıştır [13]. Taşdemiroğlu ve Sever, Türkiye'deki farklı iklim bölgeleri için (Ankara, Antalya, Gebze, İzmir, Diyarbakır ve Samsun) günlük global güneş ışınımının atmosfer dışı global güneş ışınımına oranı (Q/Q_0) ile güneşlenme süresinin gün uzunluğuna oranı (t/t_0) arasında ikinci dereceden bir ilişki kurarak model oluşturmuşlardır [14]. Aksoy, ölçtüğü güneşlenme süresi ve güneş ışınımı arasında ikinci dereceden bir ilişki kurarak Ankara, Antalya, Samsun, Konya, Urfa ve İzmir için aylık ortalama global güneş ışınımını %4 bağlı hata ile tahmin etmiştir [15]. Said ve arkadaşları, Tripoli için yatay düzleme gelen global ve yayılı güneş ışınımını tahmin etmek için farklı korelasyonları incelemiştir [16]. Togrul ve Togrul, Türkiye için aylık ortalama global güneş ışınımını tahmin etmek için çeşitli regresyon analizleri uygulamışlardır. Geliştirilen denklemler Türkiye için iyi sonuçlar vermekle birlikte bazı şehirlerde ve sezonluk analizler (yaz ve kış) daha iyi sonuç vermiştir [17]. Tahran ve Sarı, Karadeniz bölgesinin güneş ışınımını Amasya, Çorum, Ordu, Samsun ve Tokat için incelemiştir. Aylık ortalama günlük ışınımı tahmin etmek için ikinci dereceden polinom denklemi geliştirmişlerdir. Ayrıca aylık ortalama günlük yayılı ve direkt güneş ışınımını tahmin eden literatürde yer alan altı modele bağlı olarak hibrit bir model geliştirmişlerdir [18]. Jin ve arkadaşları, Çin'deki 69 meteoroloji istasyonundan aldıkları güneş ışınım ve güneşlenme süresi verilerini kullanarak yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük global güneş ışınımını tahmin etmişlerdir [19]. Aras ve arkadaşları, İç Anadolu Bölgesi'ndeki on iki il için global ışınım analizi yapmışlardır. Altı yıllık güneş ışınımı ve güneşlenme süresi verilerini Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alıp yatay düzleme gelen aylık global güneş ışınımını tahmin eden ampirik modeller geliştirmişlerdir [20]. Bazı çalışmalarda

günlük global güneş ışınımının atmosfer dışı global güneş ışınımına oranı (Q/Q_0) ile güneşlenme süresinin gün uzunluğuna oranı (t/to) arasında üçüncü dereceden bir ilişki kurarak model geliştirilmiştir [21-24]. Kılıç ve Öztürk, komşu ülkelerdeki ölçülen değerlerle çok iyi uyum sağlayan Angström denklemi katsayılarını hesaplayan bağıntı geliştirmişlerdir [25]. Bulut ve Büyükalaca, Türkiye'nin farklı bölgeleri için Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan ışınım verilerini inceleyip yatay düzleme gelen günlük toplam ışınım değerini sadece gün sayısına bağlı olarak hesaplayan bağıntı geliştirmişlerdir [26]. Hargreaves ve Samani, günlük maksimum ve minimum sıcaklık farkına bağlı olarak yatay düzleme gelen toplam güneş ışınımını hesaplayan model geliştirmişlerdir [27]. Bristow ve Campbell, günlük güneş ışınımını günlük sıcaklık aralığının üssel asimptotik fonksiyonu olarak tanımlayan modeli geliştirmişlerdir [28]. Donatelli ve Campbell ile Goodin ve arkadaşları, buna benzer model geliştirmişlerdir [29,30]. Annandale ve arkadaşları, Hargreaves ve Samani'nin [27] modelini geliştirmişlerdir [31]. Literatürde meteoroloji verilerine dayalı modellerde yer almaktadır. Zhang ve Huang kuru termometre sıcaklığı, bağlı nem, rüzgâr hızı ve yönü, bulut kapallık oranını kullanarak Çin için geçerli saatlik ışınımı tahmin eden model geliştirmiştir [63]. Yaman ve Arslan bu modelin katsayılarını Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünden elde ettikleri uzun yılların ortalama değerlerini kullanarak Mersin için yeniden düzenlemişlerdir [64].

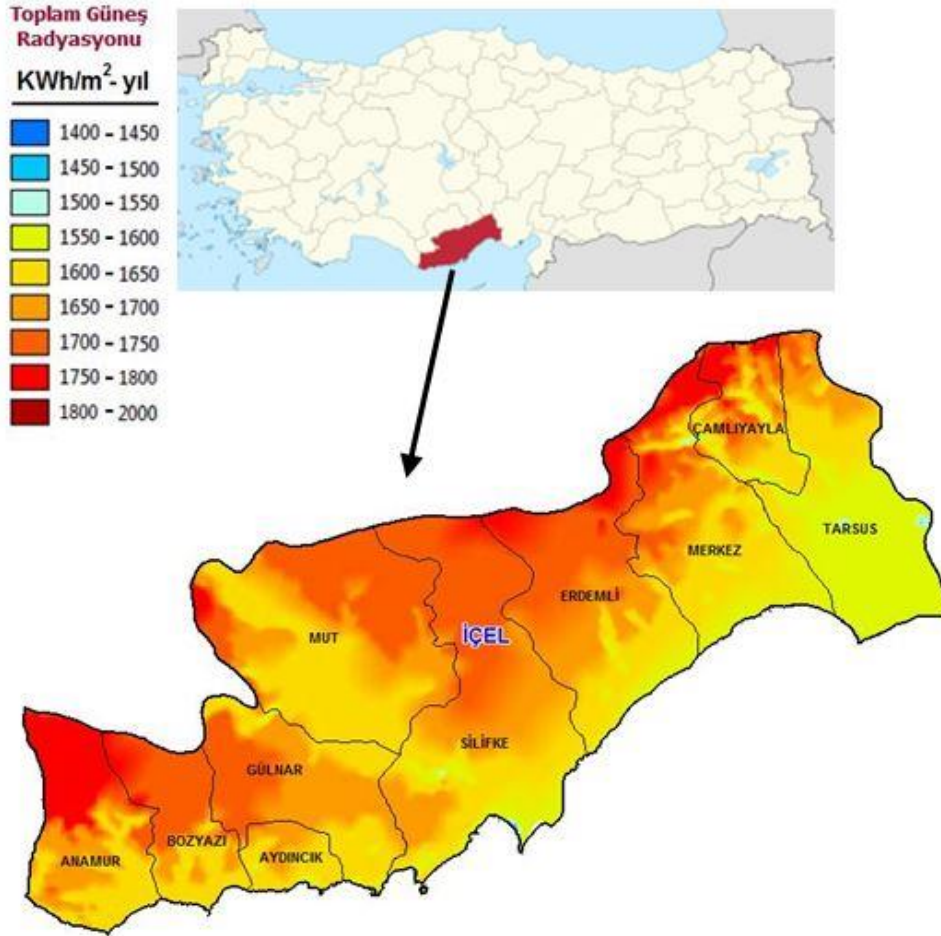
Güneş ışınımının YSA ile tahmini ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Bou-Rabee ve arkadaşları, Kuveyt için günlük ortalama güneş ışınım değerlerini tahmin eden bir modeli yapay sinir ağlarını kullanarak geliştirmişlerdir [32]. Vakili ve arkadaşları, meteorolojik verilere bağlı yapay sinir ağları kullanılarak yapılan günlük ışınım değerlerinin tahmininde partiküller madde kirliliğinin etkisini inceleyerek tahmin modelinin verimliliğini arttırmışlardır [33]. Xue, günlük yayılan güneş ışınımını tahmininde geri yayılım sinir ağı modelinin etkinliğini ve genelleme kabiliyetini arttırmak için genetik algoritma (GA) ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) tekniklerini kullanmıştır [34]. Renno ve arkadaşları, bir konuttaki fotovoltaik uygulaması için günlük global güneş ışınımını ve saatlik direkt güneş ışınımı değerlerini tahmin etmek için iki yapay sinir ağı modelini geliştirmişlerdir [35]. Zou ve arkadaşları, interpolasyon tekniği temelli bir yapay sinir ağı kullanarak Çin'in güneydoğusundaki global güneş ışınımını tahmin etmişlerdir [36]. Sincen ve arkadaşları, Aydın ilinde insan sağlığını etkileyen; sıcaklık, hava kalitesi indeksi ve ultraviyole indeksi parametrelerini toplayıp yapay sinir ağı ile analiz ederek ileriye dönük bu parametreleri tahmin eden ve insanları sms ve e-posta ile uyanan modeli geliştirmişlerdir [37]. Yıldız ve Gurer, Sultansazlığı'nda serbest su yüzeyinden gerçekleşen buharlaşmanın hesabı için Penman ve Yapay Sinir Ağları Metotlarını kullanmış olup hesapladıkları buharlaşma değerlerini gerçek buharlaşma gözlemleri ile karşılaştırmışlardır [38].

Bu çalışmanın konusuna benzer literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır. Ancak, Mersin ili için ölçülen global güneş ışınımının YSA ile tahmin edilmesi ve yaygın ışınım modelleri ile karşılaştırılması amacıyla yapılan bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran farklı yönler vardır: İlk farklı yön olarak, literatürdeki çalışmaların çoğunda tahmin edilen global güneş ışınım değerleri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilen verilerle kıyaslanmıştır. Bu çalışmada ise; yatay düzleme gelen global güneş ışınımı beş dakikalık periyotlarla Nisan 2017 – Mart 2018 tarihleri arasında CM11 model Kipp & Zonen piranometresi ile ölçülüp tahmin edilen değerlerle kıyaslanmıştır. İkinci farklı yön olarak; global güneş ışınım değerlerini etkileyen farklı parametrelere bağlı geliştirilen modeller incelenmiş ve YSA kullanılarak oluşturulan modelle kıyaslanmıştır. Literatürde bulunan YSA çalışmaları genelde ayrı çalışma şeklinde verilmiş olup diğer modellerle kıyaslanmamıştır. Bu çalışma ayrıca güneş enerjisi yatırımcılarının Mersin ili hakkında bilgi edinmesi açısından bölgesel öneme sahip olduğu için literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHODS)

Mersin, Türkiye'nin güneyinde (enlem: 36°48'K, boylam: 34°38'D) yer alan, ülke geneline bakıldığında güneş enerjisi açısından yüksek potansiyele sahip bir ilimizdir. Mersin ilinin güneş enerjisi potansiyeli haritası Şekil 1'de verilmiş olup dağlık kesimlerde ışınım değerlerinin çok yüksek olduğu nüfusun yoğun olarak yaşadığı sahil kesimlerinde ise ışınım değerlerinin 1700 – 1750 kWh/m²yıl olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Mersin ilinin güneş enerjisi potansiyeli haritası [39].

Bu çalışmada, literatürdeki bazı modeller ve yapay sinir ağları kullanılarak Mersin ilinde yatay düzleme gelen toplam günlük global güneş ışınımı değerleri tahmin edilmiştir. Ayrıca, global güneş ışınımı Kipp & Zonen CM11 model piranometre ile ölçülmüştür. Sıcaklık (°C), bağıl nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s), ve güneşlenme süresi (h) verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir.

Literatürde bulunan tahmin metotlarının çoğu günlük toplam atmosfer dışı global güneş ışınım değerini (Q_o) içermektedir. Bu değer standart geometrik kurallar kullanılarak denklem 2.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} I_{gs} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin w_s + \left(\frac{\pi w_s}{180} \right) \sin \varphi \sin \delta \right] \quad 2.1$$

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad 2.2$$

Burada $I_{gs} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ olarak güneş sabitidir. n gün sayısı, w_s gün batımı saat açısı, φ ve δ ise sırasıyla enlem ve denklinasyon açılarıdır.

Gün uzunluğu denklem 2.3'den hesaplanarak ve güneşlenme süresi (t) Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilerek Angstrom-PreScott tarafından geliştirilen model olan denklem 2.4 kullanılabilir [40].

$$t_o = \frac{2}{15} w_s \quad 2.3$$

$$\frac{Q}{Q_o} = a + b(t/t_o) \quad 2.4$$

Burada Q , yatay düzlemdeki günlük toplam global güneş ışınım değeri olup a ve b katsayıları ise regresyon katsayılarıdır.

Güneş ışınımını tahmin etmek için literatürde bulunan ve bu çalışmada oluşturulan bazı modeller Tablo 1'de verilmiştir. 1-30 aralığındaki modeller global güneş ışınımının atmosfer dışı global güneş ışınımına oranı (Q/Q_0) ile güneşlenme süresinin gün uzunluğuna oranı (t/t_0) arasında ilişki kurarak oluşturulmuş modellerdir. Model 31 sadece gün sayısına göre oluşturulmuştur. 32-36 aralığındaki modeller gün içi maksimum ve minimum hava sıcaklığına bağlı geliştirilmiştir. Model 37 ise bulut kapallılığı, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgâr hızına bağlı saatlik global güneş ışınımını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Mevcut bu modellere ek olarak Angstrom-PreScott tipi denklemin katsayıları Mersin için yeniden düzenlenerek Model 38 elde edilmiştir. Son olarak YSA kullanılarak Model 39 elde edilmiştir.

Tablo 1. Güneş ışınımını tahmin etmek için literatürde bulunan bazı modeller

Model No	Kaynak	Yıl	Model Denklemi				Çalışma Alanı
			$Q/Q_0 = a + b\left(\frac{t}{t_0}\right) + c\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 + d\left(\frac{t}{t_0}\right)^3$				
			a	b	c	d	
1	Alsaad [4]	1990	0,174	0,615			Amman, Ürdün
2	Jain ve Jain [5]	1988	0,240	0,513			Zambiya
3	Luhanga and Andringa [7]	1990	0,241	0,488			Gaborone, Botsvana
4	Almorox and Hontoria [8]	2004	0,2170	0,5453			İspanya
5	Ozturk [9]	2015	0,2787	0,3788			Isparta
6	Tiris ve ark. [40]	1997	0,18	0,62			
7	Page [41]	1961	0,23	0,48			
8	Bahel ve ark. [10]	1986	0,175	0,552			Zahran
9	Louche ve ark. [11]	1991	0,206	0,546			Akdeniz Bölgesi
10	Akınoğlu ve Ecevit [12]	1990	0,145	0,845	-0,280		
11	Ogelman ve ark. [13]	1984	0,195	0,676	-0,142		Adana, Ankara
12	Taşdemiroğlu ve Sever [14]	1991	0,225	0,014	0,001		Ankara, Antalya, Gebze, İzmir, Diyarbakır ve Samsun
13	Aksoy [15]	1997	0,148	0,668	-0,079		Türkiye
14	Said ve ark. [16]	1998	0,1	0,874	-0,255		Tripoli
15	Togrul ve Togrul [17]	2002	0,1541	1,1741	-0,705		Türkiye
16	Tahran ve Sarı [18]	2005	0,1874	0,8592	-0,4764		Amasya, Çorum, Ordu, Samsun ve Tokat
17	Jin ve ark. [19]	2005	0,1404	0,6126	0,0351		
18	Aras ve ark. [20]	2006	0,3398	0,2868	0,1187		Türkiye, İç Anadolu Bölgesi
19	Almorox ve Hontoria [8]	2004	0,1840	0,6792	-0,1228		İspanya
20	Bahel [21]	1987	0,16	0,87	-0,16	0,34	Dünya geneli
21	Samuel [22]	1991	-0,14	2,52	-3,71	2,24	Sri Lanka
22	Lewis [23]	1992	0,81	-3,34	7,38	-4,51	Tennessee
23	Ülgen ve Hepbaşlı [24]	2002	0,2408	0,3625	0,4597	-0,3708	İzmir
24	Togrul ve Togrul [17]	2002	0,1796	0,9813	-0,2958	-0,2657	Turkey

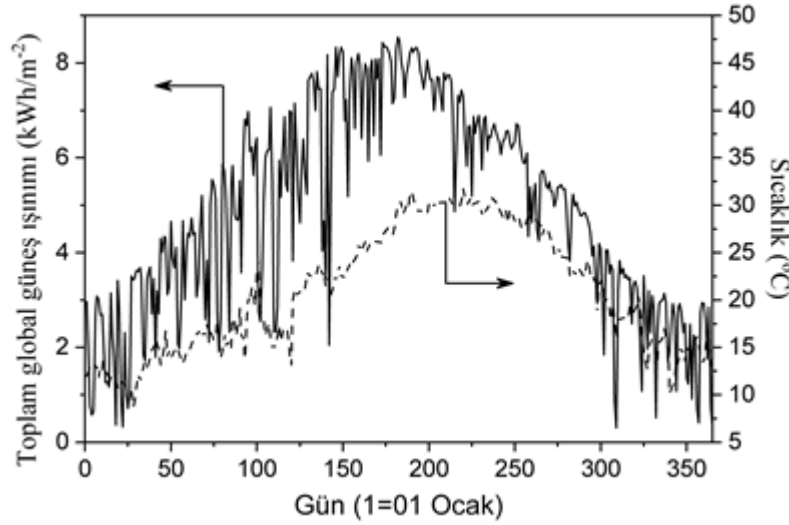
Tablo 1 devamı. Güneş ışınımını tahmin etmek için literatürde bulunan bazı modeller

Model No	Kaynak	Yıl	Model Denklemi				Çalışma Alanı
25	Ülgen ve Hepbaşlı [24]	2004	0,2854	0,2591	0,6171	-0,4834	Turkey
26	Tahran ve Sarı [18]	2005	0,1520	1,1334	-1,1126	0,4516	Amasya, Çorum, Ordu, Samsun ve Tokat
27	Jin ve ark. [19]	2005	0,1275	0,7251	-0,2299	0,1837	
28	Aras ve ark. [20]	2006	0,4832	-0,6161	1,8932	-1,0975	Türkiye, İç Anadolu Bölgesi
29	Almorox ve Hontoria [8]	2004	0,230	0,3809	0,4694	-0,3657	İspanya
30	Kılıç ve Öztürk [25]	1983	$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(e - d)$ $b = 0,533 - 0,165 \cos(e - d)$				Türkiye
31	Bulut ve Büyükalaca [26]	2007	$Q = a + (b - a) \left \sin \left[\frac{\pi(n + 5)}{365} \right] \right ^{1,5}$ <p>Mersin için: $a = 7,01$ ve $b = 25$</p>				Türkiye
32	Hargreaves ve Samani [27]	1982	$Q = Q_o \left[a(T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}} \right]$ $a = 0,1459$				
33	Bristow ve Campbell [28]	1984	$Q = Q_o a [1 - \exp(-b\Delta T^c)]$ $\Delta T = T_{max(i)} - (T_{min(i)} + T_{min(i+1)})/2$				
			0,7025	0,0101	1,9034		
34	Donatelli ve Campbell [29]	1998	$Q = Q_o a \left[1 - \exp(-bf(T_{avg})\Delta T^2 \exp(\frac{T_{min}}{c})) \right]$ $\Delta T = T_{max(i)} - (T_{min(i)} + T_{min(i+1)})/2$ $f(T_{avg}) = 0,017 \exp(\exp(-0,053T_{avg(i)}))$ $T_{avg(i)}(^{\circ}C) = (T_{max(i)} + T_{min(i)})/2$				
			0,7107	0,2481	67,4299		
35	Goodin ve ark. [30]	1999	$Q = Q_o a [1 - \exp(-b(\Delta T^c/Q_o))]$				
			0,6849	0,3337	1,9442		
36	Annandale ve ark. [31]	2002	$Q = Q_o \left[a(1 + 2,7 * 10^{-5} Z(T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}}) \right]$ $a = 0,1439$				
37	Yaman ve Arslan [64]	2018	$I_{model} = [I_{GS} \sin(h) \{c_0 + c_1 CC + c_2 CC^2 + c_3(T_i - T_{i-3}) + c_4 RH + c_5 V_r\} + d]/k$ $c_0 = 37,6865; c_1 = 13,9263;$ $c_3 = 0,9695; c_4 = -0,2046; c_5 = -0,098;$ $d = -10,8568; k = 49,3112$				Mersin
38	Mevcut çalışma (Angstrom Prescott tipi)		$Q/Q_o = a + b \left(\frac{t}{t_o} \right)$ $a = 0,5498; b = 0,0543$				Mersin
39	Mevcut çalışma (YSA)						Mersin

2.1. Güneş Işınımının Ölçülmesi (Measurement of the Solar Radiation)

Yatay düzleme gelen global güneş ışınımı beş dakikalık periyotlarla Nisan 2017 – Mart 2018 tarihleri arasında CM11 model Kipp & Zonen piranometresi ile ölçülmüştür. Ölçüm düzeneği Mersin Üniversitesi Çiftlikköy yerleşkesi içerisinde gün boyunca güneş alan bir bölgeye kurulmuştur. Ölçüm düzeneği belirsizliği $\pm\%2$ olan CM 11 model piranometre, yüksek doğruluktaki CR 800 model veri kaydedici ($\pm\%0,06$), bilgisayar ve bataryadan (12V, 9A) oluşmaktadır.

Ölçülen yatay düzleme gelen günlük toplam global güneş ışınımı ve günlük ortalama sıcaklık değerleri Şekil 2’de verilmiştir. Buna göre, günlük toplam güneş ışınımı yaz günlerinde $4200 - 8500 \text{ Whm}^{-2}$ ve kış günlerinde ise $320 - 4600 \text{ Whm}^{-2}$ bandında değer almaktadır. Ayrıca, hava sıcaklığının güneş ışınım değerleriyle uyumlu bir şekilde değiştiği anlaşılmakta olup hava sıcaklığının yaz ayı günlerinde ortalama 30°C ’nin üzerine çıktığı ve kış ayı günlerinde ise ortalama 10°C ’ye kadar indiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2. Günlük toplam global güneş ışınımı ve günlük ortalama hava sıcaklığı.

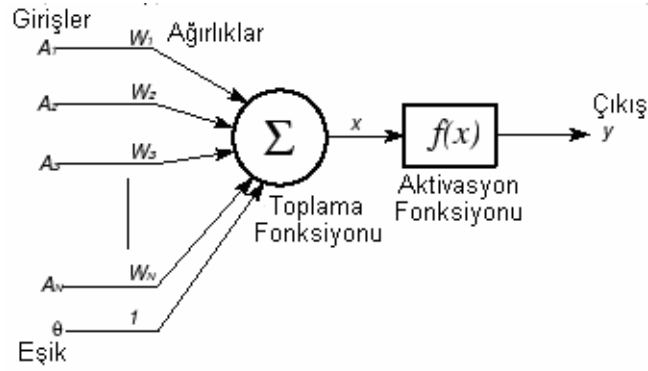
2.2. Yapay Sinir Ağı Uygulaması (Application of Artificial Neural Network)

Yapay sinir ağları, modellenen ve öğrenen algoritmaya sahip sistemler olup insan beyninin sinir hücresi yapısından esinlenerek geliştirilmiştir. Modelleme ve kontrol konularında geniş uygulama alanları bulmuştur [42]. Bir YSA süreç elemanları olarak adlandırılan yapay nöronlardan oluşmaktadır [43]. YSA Şekil 3’te gösterildiği gibi; girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olmak üzere beş temel elemandan oluşmaktadır [44].

Yapay nöron j'nin görevi basittir ve komşu nöronlardan bağlantı ağırlıkları (W_{ij}) ile ağırlıklandırılmış alıcı giriş sinyallerinden (X_i) oluşur. Bu ağırlıklı sinyalin toplamı, nöronun toplam veya net girişini (net_j) sağlar. Daha sonra, nöron j'nin aktivasyon eşiği, pozitif veya negatif θ_j değeriyle, net girdiye eklenir ve net girdiye matematiksel bir fonksiyon (transfer fonksiyonu) uygulanarak, çıktı değeri Y_j hesaplanır ve diğer nöronlara gönderilir. Bu süreç denklem 2.5 ve 2.6'da özetlenmiştir [45].

$$net_j = \sum_i^n X_i W_{ij} - \theta_j \quad 2.5$$

$$Y_j = f(net_j) \quad 2.6$$



Şekil 3. YSA'nın Süreç Elemanları [45].

Güneş ışınlamı değeri birçok parametreye bağlı olduğu için YSA'da çeşitli modeller elde etmek mümkündür. Literatürde yer alan bazı YSA çalışmalarında kullanılan değişkenler, algoritmalar ve performansları Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde literatürde yer alan YSA uygulamalarında güneş ışınlamının başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir.

Tablo 2. Güneş ışınlamını tahmin etmek için YSA'da kullanılan giriş değişkenleri [46]

Kaynak	Giriş değişken(leri)	Çalışma alanı	Öğrenme algoritması	Çıkış değişkeni	R veya R ²
[46]	Sıcaklık (en yüksek ve en düşük) ve atmosfer dışı ışınlam	İran'nın güneybatısı	LM (Levenberg-Marquardt)	Günlük global güneş ışınlamı	0,8890
[47]	Enlem, boylam, rakım, ay, ortalama güneşlenme süresi ve ortalama sıcaklık	Türkiye	LM, SCG (Scaled conjugate gradient), PCG (Polar-Ribiere conjugate)	Türkiye'nin güneş potansiyeli (aylık veri kullanılmış)	0,9989
[48]	Enlem, boylam, rakım, ay, ortalama güneşlenme süresi, ortalama sıcaklık ve bağıl nem	Nijerya	LM, SCG	Aylık global güneş ışınlamı	0,9710
[49]	Sıcaklık, bağıl nem, güneşlenme süresi ve yılın günleri	Medine (Suudi Arabistan)	LM	Günlük global güneş ışınlamı	0,9765
[50]	Sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı ve rüzgar yönü	Mısır	BP	Günlük ve saatlik yayılan fraksiyon	0,9770
[51]	Enlem, boylam, rakım, yılın ayları ve ortalama bulutluluk	Türkiye'nin akdeniz bölgesi	BP	Aylık global güneş ışınlamı	0,9978
[52]	Yılın günleri, günlük ortalama hava sıcaklığı, bağıl nem, güneşlenme süresi, rüzgar hızı ve buharlaşma	Dezful (İran)	LM	Günlük global güneş ışınlamı	0,9957
[53]	Ortalama sıcaklık ve bağıl nem	Onitsha (Nijerya)	-	Günlük global güneş ışınlamı (yatay düzlemde)	Farklı test uygulanmış
[54]	Global güneş ışınlamı, uzun dönem emisyon değerleri, hava sıcaklığı, bağıl nem ve hava basıncı	Turkey	LM	Aylık ortalama günlük toplam global güneş ışınlamı	0,9936
[55]	Yılın günleri, bağıl nem ve günlük ortalama sıcaklık	Abha (Suudi Arabistan)	BP	Günlük global güneş ışınlamı	Farklı test uygulanmış
[56]	Sıcaklık, basınç, rüzgar hızı ve rüzgar yönü	Korsika (Fransa)	LM, BP	Saatlik global güneş ışınlamı	Farklı test uygulanmış
[57]	Güneşlenme süresi, maksimum sıcaklık, bulut kapallığı, enlem, boylam ve rakım	Uganda	LM (en iyi sonucu veren algoritma)	Aylık ortalama günlük global güneş ışınlamı (yatay düzlemde)	0,9740
[58]	Gece ve gündüz toprak sıcaklığı farkı, bitki örtüsü indeksi, gün sayısı, yerel hava basıncı oranı ve deniz seviyesinde	Tibet Platosu	SCG, BR		0,89-0,99
[59]	Enlem, boylam, rakım ve güneşlenme süresi	Suudi Arabistan Krallığı	BP	Aylık ortalama günlük global güneş ışınlamı	Farklı test uygulanmış
[60]	Meteorolojik tahminler	Le Bourget du Lac (Fransa)	BP	Günlük global güneş ışınlamı (yatay düzlemde)	Farklı test uygulanmış
[61]	Yılın ayları, enlem, boylam, rakım ve güneşlenme oranı	Umman	BR	Aylık global güneş ışınlamı	Farklı test uygulanmış

Bu çalışmada, YSA tasarımı için Matlab nntool arayüzü kullanılmıştır. Nöron ve tabaka sayısı değiştirilerek en iyi sonucu veren yüz nöron ve iki tabakadan oluşan ileri beslemeli YSA modeli tasarlanmıştır. Bu modelde sırasıyla; Levenberg Marquand (Trainlm) geri yayılım eğitim algoritması, Logsig transfer fonksiyonu ve Purelin transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Ağın eğitilmesi işleminde girdi olarak, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan ölçülmüş günlük ortalama hava sıcaklığı (°C), bağıl nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) verileri kullanılmıştır. Çıktı olarak ise, 2017 yılında ölçülen günlük toplam global güneş ışınımı değerleri (Wh/m²) kullanılmıştır. Ağın eğitiminde, iterasyon ve doğrulama hata sayısı 100, gradient değeri 1e-7 ve performans fonksiyonu ortalama karesel hata (mse) olarak seçilmiştir. Ayrıca ağda kullanılan dividerand algoritması verileri kendi içerisinde %70 eğitim, %15 test ve %15 doğrulama için rastgele ayırmıştır.

2.3. İstatiksel Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Global güneş ışınımı tahmininde literatürde yaygın olarak R², RMSE, MBE, MABE, MPE ve MAPE istatistiksel parametreleri kullanılmıştır. Bu parametreler aşağıda verilmiştir:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{\hat{o}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\hat{o}} - \bar{Q}_{\hat{o}})^2} \quad 2.7$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum (Q_{i\hat{o}} - Q_{ih})^2 \right]^{0.5} \quad (kWhm^{-2} gün^{-1}) \quad 2.8$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum Q_{i\hat{o}} - Q_{ih} \quad (kWhm^{-2} gün^{-1}) \quad 2.9$$

$$MABE = \frac{1}{n} \sum |Q_{i\hat{o}} - Q_{ih}| \quad (kWhm^{-2} gün^{-1}) \quad 2.10$$

$$MPE = \frac{100}{n} \sum \frac{Q_{i\hat{o}} - Q_{ih}}{Q_{i\hat{o}}} \quad (\%) \quad 2.11$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{Q_{i\hat{o}} - Q_{ih}}{Q_{i\hat{o}}} \right| \quad (\%) \quad 2.12$$

Belirlilik katsayısı (R²), bir değişkenin diğer bir değişkene bağlılığın göstergesi olup 0<R²<1 arasında değer almaktadır. Bu değer bire ne kadar yakınsa değişkenler arasında o derece güçlü bir bağ vardır.

Ortalama hata kareleri kökü (RMSE), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki sapmanın göstergesi olup incelenen modelin kısa dönem performansı hakkında bilgi verir. RMSE değeri sıfıra ne kadar yakınsa modelin performansı o kadar yüksektir.

Ortalama sapma hatası (MBE), incelenen modelin uzun dönem performansı hakkında bilgi verir. MBE değeri sıfıra ne kadar yakınsa modelin performansı o kadar yüksektir. Bu değer pozitif olursa hesaplanan değer üstünde negatif olursa hesaplanan değer altında bir tahmin yapılmıştır.

Ortalama mutlak sapma hatası (MABE), MBE değerinin mutlak değerine eşittir. Bu değerde aynı şekilde sıfıra ne kadar yakınsa modelin performansı o kadar yüksektir.

Ortalama hata yüzdesi (MPE), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki sapmanın yüzdesel değerinin göstergesi olup değeri sıfıra ne kadar yakınsa modelin performansı o kadar yüksektir.

Ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE), MPE değerinin mutlak değerine eşittir. Bu değerde aynı şekilde sıfıra ne kadar yakınsa modelin performansı o kadar yüksektir.

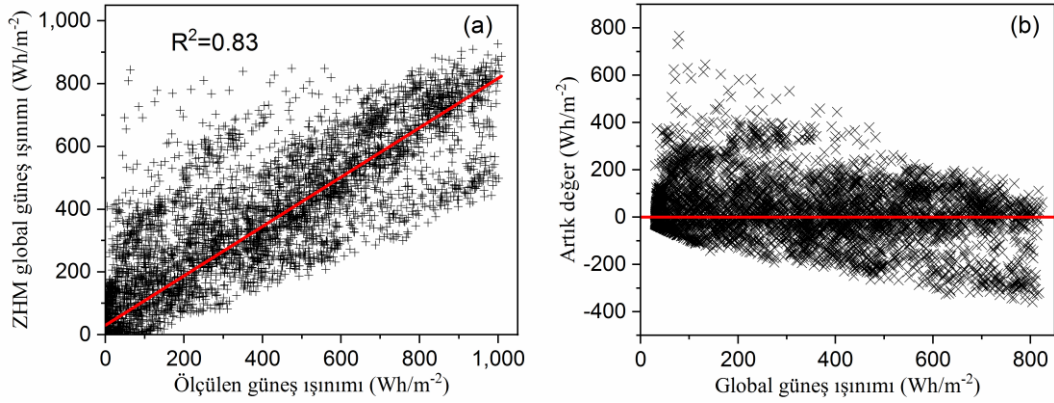
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma kapsamında incelenen modellerin performansları Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre, belirlilik katsayısına (R^2) göre en iyi performansı Model 37 (Zhang ve Huang; $R^2=0,83$) göstermiştir. Bunu performans olarak sırasıyla model 31 (Bulut ve Büyükalaca; $R^2=0,78$), Angstrom-Prescott tipi Mersin'e uyarlanan Model 38 ($R^2=0,75$) ve YSA kullanılarak oluşturulan Model 40 ($R^2=0,75$) takip etmektedir. Model 37'nin diğer modellere göre iyi performans göstermesi saatlik olması, hava sıcaklığı, bağıl nem rüzgâr hızı ve en önemlisi bulut kapalılığı parametrelerini içermesidir. Yaman ve Arslan [64] bu modelin başarısını bulut kapalılığının dikkate alınmasına bağlamıştır. Model 31'in sadece gün sayısına bağlı olmasına rağmen iyi performans göstermesinin sebebi Mersin için önerilen katsayılarla göre hesaplanmış olmasıdır.

Tablo 3. Modellerin istatistiksel sonuçları

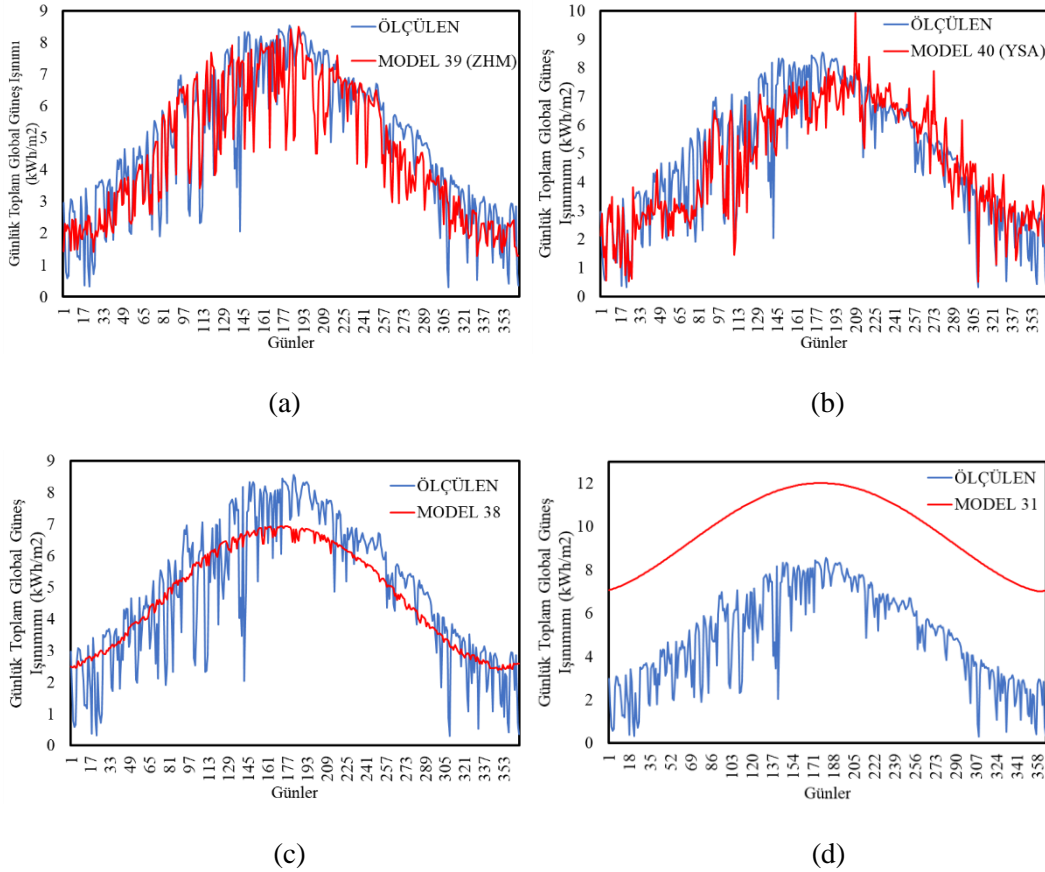
Model	R^2	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE	Model	R^2	RMSE	MBE	MABE	MPE	MAPE
1	0,62	1,47	0,62	1,19	-3,45	38,75	21	0,46	2,84	-1,49	2,40	-53,45	72,26
2	0,52	1,63	0,19	1,19	-14,41	42,50	22	0,45	1,86	0,31	1,35	-10,45	45,15
3	0,57	1,49	0,19	1,09	-15,18	40,63	23	0,64	1,60	0,90	1,38	0,82	41,28
4	0,57	1,49	0,32	1,10	-12,21	40,01	24	0,57	1,49	0,31	1,10	-12,36	40,00
5	0,55	1,54	0,21	1,12	-14,50	41,06	25	0,59	1,42	0,21	1,03	-16,16	39,90
6	0,61	1,47	0,60	1,19	-6,17	39,47	26	0,59	1,42	0,24	1,05	-14,49	39,68
7	0,52	1,63	0,11	1,20	-16,30	43,07	27	0,60	1,50	0,62	1,20	-5,95	39,82
8	0,57	1,52	0,45	1,15	-8,90	39,88	28	0,49	1,72	0,32	1,26	-10,74	42,89
9	0,53	1,63	0,51	1,21	-6,61	40,67	29	0,65	1,29	0,15	0,98	-17,60	39,08
10	0,54	1,55	0,29	1,14	-12,30	40,78	30	0,56	1,52	0,26	1,10	-13,29	40,45
11	0,54	1,56	0,32	1,13	-11,97	40,62	31	0,78	5,01	-4,89	4,89	-175,65	175,61
12	0,56	1,52	0,26	1,10	-13,53	40,48	32	0,62	1,85	1,22	1,60	6,84	43,57
13	0,58	1,48	-0,13	1,04	-24,03	42,30	33	0,38	2,54	1,88	2,15	23,80	50,61
14	0,52	1,64	0,43	1,20	-8,50	41,06	34	0,01	2,63	1,97	2,23	25,56	51,75
15	0,51	1,67	0,43	1,20	-8,58	41,25	35	0,59	1,40	-0,20	0,96	-33,32	45,05
16	0,59	1,42	0,19	1,03	-16,78	39,95	36	0,62	1,89	1,27	1,64	8,09	43,83
17	0,61	1,52	0,68	1,24	-4,61	39,97	37 ZHM	0,83	119,58	13,39	64,43	16,33	24,14
18	0,50	1,71	0,33	1,25	-10,33	42,55	38 Lineer	0,75	1,13	0,12	0,92	-21,33	38,94
19	0,62	1,36	0,11	1,01	-18,06	39,85	39 YSA	0,75	1,10	0,18	0,85	-7,92	27,67
20	0,55	1,55	0,26	1,12	-13,41	40,82							

Belirlilik katsayısına (R^2) göre en iyi performansı gösteren Model 37'ye (ZHM) karşılık ölçülen saatlik global güneş ışınımı verileri Şekil 4(a)'da ve artık değerler ise Şekil 4(b)'de göstermiştir.



Şekil 4. Ölçülen global güneş ışınlamına karşılık güneş ışınlam modeli (a) ZHM modeli ve (b) Artık değer.

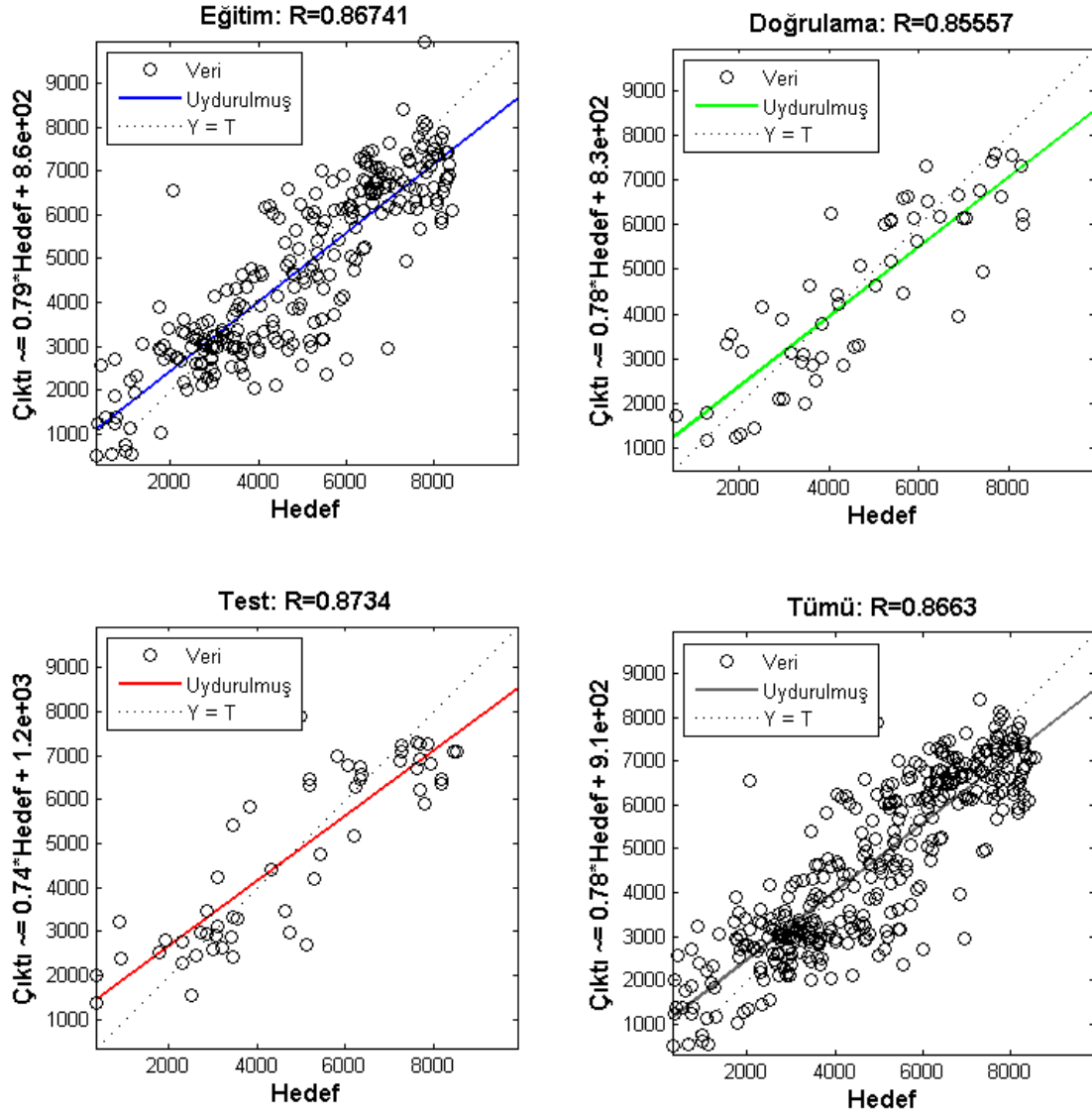
Ölçülen ve bazı modellerle tahmin edilen global güneş ışınlam değerleri günlük olarak Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre, ölçülen değer grafiğiyle en çok benzer eğilim gösteren model ZHM modelidir (Şekil 5a) ve bunu YSA modeli (Şekil 5b) takip etmiştir. Model 38 (Şekil 5c) ve Model 31 (Şekil 5d) için aynı yorum yapılamaz. Çünkü bu modeller basit regresyon analiziyle oluşturulmuş modellerdir.



Şekil 5. Ölçülen ve modeller ile tahmin edilen ışınlam değerleri.

YSA'da kullanılan dividerand algoritması 365 veriyi kendi içerisinde %70 eğitim (274 veri), %15 (55 veri) test ve %15 (55 veri) doğrulama için rastgele ayırmıştır. Bunların ayrı ayrı ve tamamının performansını gösteren regresyon eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, belirlilik katsayısı (R^2); eğitim, test, doğrulama ve tüm veriler için sırasıyla 0,7524, 0,7628, 0,7320 ve 0,7504 değerlerini almaktadır. Bu değerlerin birine yakınlığı modelin başarısını göstermekte olup ZHM saatlik modeline göre performansı düşüktür. Bunun nedeni, bu çalışmada bir yıllık ölçülmüş verilerin kullanılmasıdır. YSA modelinin başarısı modelde uzun yıllar ölçülmüş verilerin kullanılmasına, parametre sayısı ve türüne bağlı olduğu düşünülmektedir. Çünkü literatürdeki çalışmalarda (Tablo 2'de verilen çalışmalar gibi) YSA ile çok iyi tahmin sonuçları elde

edilmiştir. ZHM modelinin başarısının ise bulutluluk oranı parametresinin kullanılması ve bu modelin saatlik tahmin sonuçları vermesinden ötürü olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. YSA regresyon eğrileri.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, literatürde bulunan bazı modeller incelenerek ve yapay sinir ağları kullanılarak yatay düzleme gelen günlük global güneş ışınımının tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Global güneş ışınımının atmosfer dışı global güneş ışınımına oranı (Q/Q_0) ile güneşlenme süresinin gün uzunluğuna oranı (t/t_0) arasında ilişki kurularak oluşturulmuş modeller bölgelere göre basit regresyon analizi sonucunda elde edildiği için düşük performans göstermiş olup Mersin için kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Bu yüzden Mersin için regresyon analizi yapılarak Angstrom-PreScott tipi Model 38 oluşturulmuştur. Bu modelin belirlilik katsayısı (R^2) 0,75, ortalama mutlak sapma değeri (MAPE) ise %38,94 olarak bulunmuştur.

Sadece gün sayısına bağlı olarak oluşturulmuş ve literatürde mevcut Mersin için kullanılacak katsayıların önerildiği Model 31 (Bulut ve Büyükalaca) için belirlilik katsayısı (R^2) 0,78 olarak bulunmuştur, ancak ortalama mutlak sapma değerinin (MAPE) %175,61 olması modelin başarısızlığını göstermektedir.

Gün içi maksimum ve minimum hava sıcaklığına bağlı geliştirilmiş 32-36 aralığındaki modeller düşük performans gösterdiği için Mersin için kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

Bulut kapalılığı, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgâr hızına bağlı saatlik global güneş ışınımını tahmin etmek için geliştirilmiş Model 37'nin belirlilik katsayısı (R^2) 0,83 olarak bulunmuştur. Bu modelin iyi performans göstermesinin nedeni diğer modellerden farklı olarak daha çok parametreyi dikkate alarak ve bölgenin meteoroloji verilerini kullanarak oluşturulmuş olması ile saatlik olmasıdır.

Güneş ışınımını tahmin etmek için ayrıca oluşturulan YSA modelinde belirlilik katsayısı (R^2) 0,75 ve ortalama mutlak sapma değeri (MAPE) %27,67 olarak bulunmuştur. Bu modelin çok iyi performans göstermemesinin nedeni çalışmada bir yıllık ölçülmüş verilerin kullanılmış olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, incelenen ve oluşturulan modeller içerisinde en iyi performansı Yaman ve Arslan [64] tarafından katsayıları düzenlenen ZHM modeli göstermiştir. Daha iyi sonuçların elde edilmesi için geliştirilecek modellerde; güneş ışınımını etkileyen parametrelerin sayısının artırılması, algoritmaların geliştirilmesi ve uzun dönem ölçüm verilerinin kullanılmasını önerilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 2017-2-AP4-2584 no'lu proje ile desteklenmiştir.

SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS and ABBREVIATIONS)

a, b, c, d	: Denklem katsayıları
$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, d, k$: ZHM modelinin katsayıları
CC	: Bulut kapalılığı
h	: Saat açısı ($^{\circ}$)
e	: Enlem ($^{\circ}$)
n	: Gün sayısı
t	: Güneşlenme süresi (saat)
t_0	: Gün uzunluğu (saat)
T_{min}, T_{max}	: Minimum ve maksimum sıcaklık ($^{\circ}C$)
ΔT	: Sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
Q, Q_0	: Günlük global ve atmosfer dışı güneş ışınımı ($kWh\ m^{-2}$)
$Q_{ih}, Q_{iö}$: Hesaplanan ve ölçülen ışınım ($kWh\ m^{-2}$)
RH	: Bağıl nem (%)
I_{model}	: Anlık global güneş ışınımı ($kWh\ m^{-2}$)
I_{GS}	: Güneş sabiti ($1367\ W\ m^{-2}$)
V_r	: Rüzgâr hızı (m/s)
z	: Rakım (m)
YSA	: Yapay sinir ağı
ZHM	: Zhang ve Huang modeli
RMSE	: Ortalama hata kareleri kökü
MBE	: Ortalama sapma hatası
MABE	: Ortalama mutlak sapma hatası
MAPE	: Ortalama mutlak hata yüzdesi
MPE	: Ortalama hata yüzdesi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. Bayhan, G. Arslan, Applicability of solar and wind energy technologies for a non-residential building. Turkish Journal of Engineering, 2: 1 (2018) 27-34.
- [2] G. Arslan, B. Bayhan, Solar energy potential in Mersin and a simple model to predict daily solar radiation. Mugla Journal of Science and Technology, Special Issue (2016) 1-4.
- [3] M. Şahan, Y. Okur, Akdeniz bölgesine ait meteorolojik veriler kullanılarak yapay sinir ağları yardımıyla güneş enerjisinin tahmini. SDÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 11: 1 (2016) 61-71.

- [4] M. A. Alsaad, Characteristic distribution of global radiation for Amman, Jordan. *Solar Wind Technol.*, 7 (1990) 261–266.
- [5] S. Jain, P. C. Jain, A comparison of the Angstrom-type correlations and the estimation of monthly average daily global irradiation. *Solar Energy*, 40 (1988) 93–98.
- [6] J. E. Hay, Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy* 23 (1979) 301-307.
- [7] P. V. C. Luhanga, J. Andringa, Characteristic of solar radiation at Sebele, Gaborone, Botswana. *Solar Energy*, 44 (1990) 71–81.
- [8] J. Almorox, C. Hontoria, Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Convers. Manage.*, 45 (2004) 1529–1535.
- [9] M. Ozturk, An Evaluation of global solar radiation empirical formulations in Isparta. Turkey, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37 (2015) 2474–2486.
- [10] V. Bahel, H. Bakhsh, R. Srinivasan, A correlation for estimation of global solar radiation. *Energy*, 12 (1987) 131–135.
- [11] A. Louche, G. Notton, P. Poggi, G. Simonnot, Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy*, 46 (1991) 261–266.
- [12] B. G. Akinoğlu, A. Ecevit, A further comparison and discussion of sunshine based models to estimate global solar radiation. *Solar Energy*, 15 (1990) 865–872.
- [13] H. Ogelman, A. Ecevit, E. Tasdemiroglu, A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 33 (1984) 619–625.
- [14] E. Tasdemiroglu, R. Sever, An improved correlation for estimating solar radiation from bright sunshine data for Turkey. *Energy Convers. Manage.*, 31 (1991b) 599–600.
- [15] B. Aksoy, Estimated monthly average global radiation for Turkey and its comparison with observations. *Renewable Energy*, 10 (1997) 625–633.
- [16] R. Said, M. Mansor, T. Abuain, Estimation of global and diffuse radiation at Tripoli. *Renewable Energy*, 14 (1998) 221–227.
- [17] I. T. Togrul, H. Togrul, Global solar radiation over Turkey: Comparison of predicted and measured data. *Renewable Energy*, 25 (2002) 55–67.
- [18] S. Tahran, A. Sarı, Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey. *Energy Convers. Manage.*, 46 (2005) 605–613.
- [19] Z. Jin, W. Yezheng, Y. Gang, General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China. *Energy Convers. Manage.*, 46 (2005) 257–268.
- [20] H. Aras, O. Balli, A. Hepbasli, Global solar radiation Potential. Part 1. Model development. *Energy Sources Part B*, 1 (2006) 303–315.
- [21] V. Bahel, R. Srinivasan, H. Bakhsh, Solar radiation for Dhahran, Saudi Arabia. *Energy*, 11 (1986) 985–989.
- [22] T. D. M. A. Samuel, Estimation of global radiation for Sri Lanka. *Solar Energy*, 47 (1991) 333–337.
- [23] G. Lewis, An empirical relation for estimating global irradiation for Tennessee, USA. *Energy Convers. Manage.*, 33 (1992) 1097–1099.

- [24] K. Ulgen, A. Hepbasli, Solar radiation models. Part 2: Comparison and developing new models. *Energy Sources*, 26 (2004) 521–530.
- [25] A. Kılıç, A. Öztürk, Güneş enerjisi. Kipaş Dağıtımçılık, (1983).
- [26] H. Bulut, O. Büyükalaca, Simple model for the generation of daily global solar-radiation data in Turkey. *Applied Energy*, 84 (2007) 477-491.
- [27] G. H. Hargreaves, Z. A. Samani, Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain. Engr.*, 108 (1982) 223-230.
- [28] K. L. Bristow, G. S. Campbell, On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.*, 31 (1984) 159-166.
- [29] M. Donatelli, G. S. Campbell, A simple model to estimate global solar radiation. *Proceedings of the 5th European Society of Agronomy Congress, Nitra, (Slovak Republic 1998)*, p.133.
- [30] D. G. Goodin, J. M. S. Hutchinson, R. L. Vanderlip, M. C. Knapp, Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. *Agron. J.*, 91 (1999) 845-851.
- [31] J. G. Annandale, N. Z. Jovanic, N. Benade, R. G. Allen, Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrig. Sci.*, 21 (2002) 57-67.
- [32] M. Bou-Rabee, et al., Using artificial neural networks to estimate solar radiation in Kuwait. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72 (2017) 434-438.
- [33] M. Vakili, et al., Evaluating the effect of particulate matter pollution on estimation of daily global solar radiation using artificial neural network modeling based on meteorological data. *Journal of cleaner production*, 141 (2017) 1275-1285.
- [34] X. Xue, Prediction of daily diffuse solar radiation using artificial neural networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42:47 (2017) 28214-28221.
- [35] C. Renno, F. Petito, A. Gatto, ANN model for predicting the direct normal irradiance and the global radiation for a solar application to a residential building. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 1298-1316.
- [36] L. Zou, et al., Estimation of global solar radiation using an artificial neural network based on an interpolation technique in southeast China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146 (2016) 110-122.
- [37] M. Sinecen, B. Kaya, Ö. Yıldız, Aydın İlinde İnsan Sağlığını Birincil Dereceden Etkileyen Hava Değişkenlerine Yönelik Yapay Sinir Ağı Tabanlı Erken Uyarı Modeli. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5:4 (2017) 121-131.
- [38] F. Yıldız, İ. Gurer, Sultansazlığı sulak alanı için buharlaşma yöntemlerinin karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2:3 (2014) 247-254.
- [39] <http://www.enerjiatlasi.com> Erişim tarihi: 23 Nisan 2018.
- [40] M. Tırıs, C. Tırıs, Y. Erdalli, Water heating systems by solar energy. Marmara Research Centre, Institute of Energy Systems and Environmental Research, Nato Tucoating, Gebze, Kocaeli, Turkey (1997).
- [41] A. Angstrom, Solar and terrestrial radiation, *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, 50 (1924) 121–125.
- [42] E. Deniz, K. Atik, Güneş ışınım şiddeti tahminlerinde yapay sinir ağları ve regresyon analiz yöntemleri kullanımının incelenmesi. *Isı bilimi ve tekniği dergisi*, 27: 2 (2007) 15-20.

- [43] R. Trippi, E. Turban, *Neural Networks in Finance and Investing*. Chicago: Irwin Publishing, 1996.
- [44] L. H. Tsaukalas, R. E. Uhrig, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*. New York: Wiley, 1997.
- [45] A. Zafari, M. H. Kianmehr, R. Abdolazadeh, Modeling the effect of extrusion parameters on density of biomass pellet using artificial neural network. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 2.1 (2013) 9.
- [46] Ö. Çelik, A. Teke, H. B. Yıldırım, The optimized artificial neural network model with Levenberg–Marquardt algorithm for global solar radiation estimation in Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Journal of cleaner production*, 116 (2016) 1-12.
- [47] A. Rahimikhoob, Estimating global solar radiation using artificial neural network and air temperature data in a semi-arid environment. *Renew. energy*, 35 (2010) 2131-2135.
- [48] A. Sozen, E. Arcaklioglu, M. Ozalp, Estimation of solar potential in Turkey by artificial neural networks using meteorological and geographical data. *Energy Convers. Manag.*, 45 (2004) 3033-3052.
- [49] D. A. Fadare, Modelling of solar energy potential in Nigeria using an artificial neural network model. *Appl. energy*, 86 (2009) 1410-1422.
- [50] M. Benghanem, A. Mellit, S. N. Alamri, ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: a case study. *Energy Convers. Manag.*, 50 (2009) 1644-1655.
- [51] H. K. Elminir, Y.A. Azzam, F. I. Younes, Prediction of hourly and daily diffuse fraction using neural network, as compared to linear regression models. *Energy*, 32 (2007) 1513-1523.
- [52] A. Koca, H. F. Oztop, Y. Varol, G. O. Koca, Estimation of solar radiation using artificial neural networks with different input parameters for Mediterranean region of Anatolia in Turkey. *Expert Syst. Appl.*, 38 (2011) 8756-8762.
- [53] M. A. Behrang, E. Assareh, A. Ghanbarzadeh, A. R. Noghrehabadi, The potential of different artificial neural network (ANN) techniques in daily global solar radiation modeling based on meteorological data. *Sol. energy*, 84 (2010) 1468-1480.
- [54] G. A. Agbo, G. F. Ibeh, J. E. Ekpe, Estimation of global solar radiation at Onitsha with regression analysis and artificial neural network models. *Res. J. Recent Sci.*, 1 (2012) 27-31.
- [55] M. Ozgoren, M. Bilgili, B. Sahin, Estimation of global solar radiation using ANN over Turkey. *Expert Syst. Appl.*, 39 (2012) 5043-5051.
- [56] S. Rehman, M. Mohandes, Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity. *Energy policy*, 36 (2008) 571-576.
- [57] A. Sfetsos, A. H. Coonick, Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. *Sol. energy*, 68 (2000) 169-178.
- [58] J. Mubiru E. J. K. B. Banda, Estimation of monthly average daily global solar irradiation using artificial neural networks. *Sol. energy*, 82 (2008) 181-187.
- [59] J. Qin, Z. Chen, K. Yang, S. Liang, W. Tang, Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and TRMM products. *Appl. energy*, 88 (2011) 2480-2489.
- [60] M. Mohandes, S. Rehman, T. O. Halawani, Estimation of global solar radiation using artificial neural networks. *Renew. energy*, 14 (1998) 179-184.
- [61] B. Amrouche, L.X. Pivert, Artificial neural network based daily local forecasting for global solar radiation. *Appl. energy*, 130 (2014) 333-341.

- [62] A.S.S. Dorvlo, J.A. Jervase, A. Al-Lawati, Solar radiation estimation using artificial neural networks. *Appl. Energy*, 71 (2002) 307-319.
- [63] Q. Y. Zhang, Y. J. Huang, Development of typical year weather files for Chinese locations, *ASHRAE Transactions*, 108 (2002) 1063-1075.
- [64] K. Yaman, G. Arslan, The impact of hourly solar radiation model on building energy analysis in different climatic regions of Turkey. *Building Simulation*, 11: 3 (2018) 483-495.



Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 1-Boyutlu Sayısal Simülasyonlarla İncelenmesi: Rahmanlar Barajı Örneği

Nazlı PALAMUT KEMALOĞLU¹, Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT^{2,*}, Hüseyin AKAY²

¹Dolsar, Mühendislik Firması, Kavaklıdere Mah., 06680, Çankaya/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Çankaya/ANKARA

Öz

Baraj yıkılması sonucu oluşacak taşkın hareketinin belirlenmesi, baraj mansabında herhangi bir yerleşim yeri, ticari veya tarımsal alanların olması durumunda oluşabilecek tehlikenin saptanması açısından önemli ve gerekli bir çalışmadır. Günümüzde söz konusu çalışmalar için sayısal model simülasyonları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında İzmir'in Ödemiş İlçesinde yapımı tamamlanmak üzere olan Rahmanlar Barajı'nın 1-Boyutlu (1B) yıkılma analizleri gerçekleştirilerek barajın yıkılması sonucu oluşacak taşkın mansapta yer alan üç adet köye ulaşıp ulaşamayacağı belirlenmiştir. Çalışmada 1B sayısal benzeşimleri için HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) yazılımı kullanılmıştır. Taşkın alanları model sonuçlarına göre çizilmiş ve maksimum su yüzeyi yükseklikleri ile pik debilerin oluşma zamanları tespit edilmiştir. Yapılmış olan farklı yıkılma senaryolarına ait simülasyonlara göre 1B dinamik analizlerde akımın doğrusal bir şekilde ilerlemesi nedeniyle arazinin ve akımın fiziksel özelliklerinin istenilen doğrulukta tanımlanamadığı ve bu durumun sonuçları etkileyebildiği, ancak simülasyon süreleri göz önüne alındığında bir saat gibi bir sürede sonuçların elde edilebildiği görülmüştür. Bu nedenle Türkiye'de mevcut veya projelendirme aşamasında olan barajların mansap güvenliği ile ilgili çalışmalar yapılırken çalışmanın önem ve aciliyet durumuna göre öncelikle 1B yıkılma analizlerinin gerçekleştirilip sonuçlarının değerlendirilmesi, sonrasında öncelikle 2B ve gerekli görülmesi halinde 3B analizlerin yapılması önerilmektedir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 12/09/2018
Düzeltilme: 08/12/2018
Kabul: 10/01/2019

Anahtar Kelimeler

Baraj yıkılması
HEC-RAS
Dalga yayılması
Rahmanlar Barajı

Keywords

Dam break
HEC-RAS
Wave propagation
Rahmanlar Dam

Investigation of 1-D Numerical Simulations of Dam Break Flood Wave Propagation: Case of Rahmanlar Dam

Abstract

Determination of flood wave propagation occurring as a result of dam break is an important and essential study in determining risks on any residential, commercial or agricultural areas located in downstream regions of that dam. Today, numerical model simulations are widely used for such studies. Within the scope of this study, 1-Dimensional (1D) analysis of dam break of the Rahmanlar Dam, which is about to be completed in the Ödemiş District of İzmir was conducted to determine whether or not the flood wave occurred as a result of dam break would reach the three villages located at the downstream of the dam. In the study, the HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) was used for 1D simulations. Flooded areas have been mapped according to the results of model analysis and the maximum water surface elevations and the time of occurrence of peak discharges have been determined. According to the simulations of different dam break scenarios, it was noted that the physical properties of land and stream flow could not be identified with desired accuracy in the model due to the unidirectional flow propagation in 1D dynamic analysis and this might affect the results of the model. However, when the computational time of the model analysis was taken into account, it was found that the analysis were completed in a short period of time like one hour or so. Therefore, 1-D analysis should be carried out for safety analysis of the downstream regions of any dam in Turkey either in operation or design stage depending on the importance and urgency of the study. After evaluation of those results, it is recommended to perform 2-Dimensional analysis and, if necessary, 3-Dimensional analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Barajlar, sulama ve içme suyu temini, elektrik üretimi gibi nedenlerle inşa edilen ve membaında önemli miktarlarda su depolayabilen yapılardır. Nadir olmakla birlikte meydana gelen baraj yıkılmaları mansaplarında neden oldukları katastroofik taşkınlar nedeniyle son derece yıkıcı olabilmekte, ciddi can ve mal kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenlerle baraj yıkılması sonucunda oluşacak taşkın dalgası büyüklüğü ve yayılımının incelenerek meydana gelebilecek zararın mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir.

Baraj yıkılması ve bunun sonucunda oluşacak taşkın dalgasının mansap bölgesinde yayılması ile ilgili arazi verisi elde etmekte çeşitli zorluklar söz konusudur. Bu nedenle literatürde sınırlı sayıda deneysel çalışma ile ağırlıklı olarak sayısal model çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ortak amaç taşkın dalgası yayılma hızı ve yüksekliği gibi parametreler ile bunlar üzerinde etkili olan faktörlerin belirlenmesidir. Deneysel çalışmalarda farklı taban eğimleri ve taşkın dalgasının zamanla değişimi [1, 2, 3, 4] ile ilgili çalışmalar veya tabanda farklı engellerin olması durumları gibi farklı konular incelenmiştir [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Olası bütün baraj yıkılmalarını önlemek imkânsız olsa da yıkılmanın zararlarından kaçınmak mümkündür [14]. Bu, ancak baraj mansabındaki yerleşim alanlarına taşkın dalgası ulaşmadan erken tahliye ile başarılabilir. Bu tür afetlerin olumsuz etkilerini hafifletmek amacıyla, mevcut veriler yardımıyla sayısal ve fiziksel modellere dayalı acil eylem planları oluşturulabilir. Bu modellerin yardımıyla her baraj yıkılma olayının sel bilgisi ve taşkın dalgalarının yayılım zamanı tahmin edilerek elde edilen sonuçlar doğrultusunda acil yönetim rehberleri düzenlenebilir. Bu acil durum planları; taşkın haritalarını, her yerleşim sınırı için uyarı zaman tablolarını ve en önemlisi can kaybindan korunmak için erken uyarı sisteminin kurulmasını kapsayabilir. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) 1970'li yıllarda görülen pek çok baraj yıkılma olayı önemli can ve mal kayıpları ile sonuçlanmıştır. ABD'de o tarihlerden günümüze baraj yıkılması olayları hakkında geniş araştırmalar ve çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Türkiye'de ise baraj yıkılma olaylarının potansiyel tehlikelerinin tahmini ve acil durum yönetimi için görevlilere işe yarar veri sağlayabilmek amacıyla baraj yıkılması olaylarının sayısal analizlerinin gerçekleştirilmesi yaygınlaşarak artmaktadır [15, 16, 17].

Bu çalışmada, Türkiye'nin batısında İzmir İli'nin Ödemiş ilçesinde yer alan Rahmanlar Barajı'nın sayısal yıkılma analizlerinin yapıldığı, taşkın haritaları ile taşkın özelliklerinin belirlendiği ve mansapta bulunan yerleşim yerlerinin güvenliği ile ilgili değerlendirmenin yapıldığı Yüksek Lisans Tez çalışmasına ait sonuçlar sunulmaktadır [18]. Çalışmada sayısal analizler 1B HEC-RAS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

Çalışmada 1B analizler için ücretsiz olarak temin edilebilen HEC-RAS yazılımı kullanılmıştır. Bu modelle özellikle serbest yüzeyli akımlar için zamana bağlı ve zamandan bağımsız akım koşullarında tek yönlü olarak akarsuyun hidrolik/hidrokinamik analizleri yapılabilmektedir. Yıkılma sonucu oluşan taşkın dalgasının mansapta ötelenmesi ise zamanla değişen akım denklemleri kullanılarak yapılmaktadır. Model, süreklilik ve momentum korunumuna dayalı sıç akım denklemlerinin tek yönlü özel durumu olan Saint-Venant eşitliklerini içermektedir [19].

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad 2.1$$

$$I_E = I_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad 2.2$$

Burada A =debinin geçtiği akım alanı; Q =kesit alandan geçen toplam debi; q =kanalın birim genişliğinden geçen debi; v =kanal boyunca ortalama akım hızı; x = kanal uzunluğu; y =akım derinliği; t =zaman; I_E =enerji çizgisi eğimi; I_0 =kanal taban eğimi ve g =yerçekim ivmesini ifade etmektedir.

Temel denklemlerin yanı sıra baraj yıkılması ile ilgili bazı yaklaşımlara da ihtiyaç vardır. Baraj yıkılması esnasında gerçekleşen gedik gelişiminin simülasyonunun oluşturulması ve oluşan çıkış hidrografının bulunabilmesi için, gediğin son geometrisinin ve yıkılma oranı gibi parametrelerin

belirlenmesi gerekmektedir. Gediğin baraj eksenindeki konumunun, nihai taban genişliğinin, şev eğimlerinin, toplam oluşum süresinin, gedik oluşumunun üzerinden aşma veya borulanma gibi farklı baraj yıkılma senaryoları için başlama anının ve çıkan akımın savak veya orifis katsayısının belirlenerek HEC-RAS programında tanımlanması gerekmektedir. Baraj yıkılması sonucu baraj gövdesinde oluşacak gediğin şekli yaklaşık olarak dikdörtgen, üçgen, trapezoidal veya parabolik olarak alınabilmektedir [16]. Çalışmada HEC-RAS programında yürütülen yıkılma analizleri sonucu farklı yıkılma tiplerine bağlı olarak farklı gedik açıklıkları oluşturulmuş ve bu şekilde farklı yıkılma senaryoları elde edilmiştir.

Baraj yıkılmasında önemli olan bir diğer parameter ise yıkılma süresi olup gedik oluşumunun başlangıcından, açıklığın ulaşacağı son büyüklüğe kadar devam eden zaman olarak tanımlanmaktadır. Yıkılma süreleri en çok barajın büyüklüğüne, kullanılan gövde malzemesine ve dolgunun yapısal dayanımına bağlıdır [20]. Bu çalışmada Rahmanlar Barajı'nın yıkılma analizi için programda başlangıç ve bitiş süreleri ile otuz saniyelik hesap adım aralığı tanımlanmıştır. Özellikle dar vadelerde yapılan analizlerde hesap adım aralığı stabiliteyi etkileyen Courant sayısı ile belirlenmektedir. Fakat arazi koşullarının Rahmanlar Barajı'ndaki gibi yayvan olması durumunda Courant sayısı stabilite üzerinde direkt etkili olmamaktadır. Courant sayısına göre hesap adımı belirlenmesi durumunda ise model simülasyon süresi çok uzun olmakta ve model sonucunda gereksiz büyük dosyalar elde edilmektedir. Bu sebeple Baraj Yıkılması Modellerinde, HEC-Hydrologic Engineering Center yayınlarında da belirtildiği üzere Courant sayısından bağımsız olarak stabilite sağlanması koşuluyla hesap adım aralığı 1 saniye - 60 saniye aralığında seçilebilmektedir. Bu nedenle çalışmada bu değerlerin ortalaması olan 30 saniye kullanılmış ve stabilitenin de sağlandığı tespit edilmiştir.

Gedik genişleme oranı ise derinlik ve genişlikteki büyüme, yıkılma oranı olup, söz konusu büyüme oranı doğrusal veya doğrusal olmayan bir değişim gösterebilmektedir. Yıkılma büyüme oranı p olan gediğin mevcut taban seviyesi (h_{bt}) olarak alındığında $0 < t_b < t$ için Eş. 2.3'e göre hesaplanmaktadır [21].

$$h_{bt} = h_d - (h_d - h_{bm}) \frac{t_b}{t} p \quad 2.3$$

Burada $h_{bt}=t_b$ anında gediğin taban seviyesi; h_d =barajın taban seviyesi; t =gedik oluşum süresi; t_b = b gedik taban genişliğinin oluşması için geçen süre; $h_{bm}=t$ anında en düşük gedik taban seviyesi ve p =yıkılma oranıdır ($1 < p < 4$). Ayrıca, gedik taban genişliği b ile gedik oluşum oranı p arasında Eş. 2.4'te verilen ilişki bulunmaktadır.

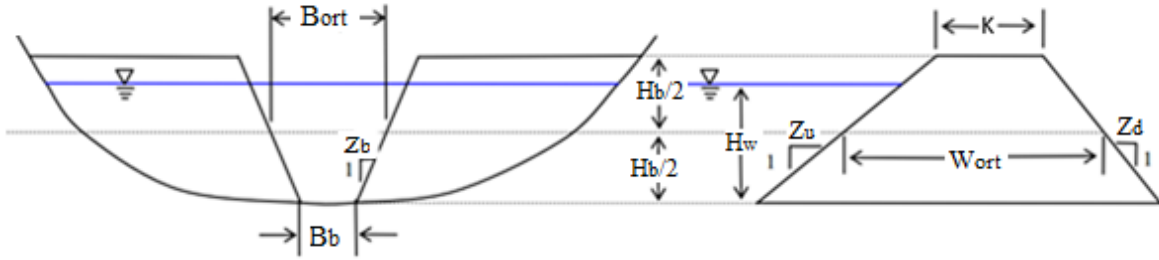
$$B_t = b_m \frac{t_b}{t} p \quad 2.4$$

Burada $B_t=t_b$ anında gedik taban genişliği ve $b_m=t$ anında maksimum gedik taban genişliğidir. Ortalama gedik genişliği, gedik şev eğimleri ile gedik oluşum süresi gibi parametreler ise literatürde farklı ampirik bağıntılar kullanılarak hesaplanabilmektedir. Çalışmada Froehlich ampirik bağıntıları kullanılmıştır [22]. Rahmanlar Barajı'nın talvegden olan yüksekliği 76 m olduğundan Froehlich yaklaşımına göre maksimum gedik yüksekliği H_b 70 m olarak seçilmiştir. H_w ise gedik tabanının su seviyesine olan yüksekliği olup 66,40 m'dir. Ortalama gedik genişliği B_{ort} ve gedik oluşum süresi t_f Froehlich formüllerine göre bulunmuştur. Gedik taban genişliği B_b ise geometriden hesaplanmıştır. Çalışmada suyun barajın üzerinden aşma durumunu içeren senaryoda şev eğimi 1:1 ve borulanma olması durumunu içeren dört senaryoda ise şev eğimi 0,7 – 1,0 aralığında alınmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri Colorado Eyaletinde Su Kaynakları İdaresi'nin Baraj Güvenliği Dairesince 2010 yılında hazırlanan "Guidelines For Dam Breach Analysis" adlı dokümanında yer alan baraj gedik parametrelerini hesaplayan farklı birçok ampirik denklem önerilmiş olup ilgili gedik değişkenleri Şekil 1'de verilmiştir [23]. Bu rehberde ayrıca tahmin hesaplarını doğrulayan birkaç genel kriter de yer almaktadır. Bu kontrol kriterlerinin başlıcaları arasında aşağıdaki iki kriter çalışma kapsamında da kullanılmıştır.

1. Ortalama gedik genişliğinin gedik yüksekliğine oranının 0,6'dan küçük olması halinde kullanılan gedik oluşum eşitliği şüpheli veya rezervuar yalnızca borulanma gerçekleştirecek kadar küçük demektir.

2. Ortalama gedik genişliğinin, gedik oluşum süresine oranı olarak ifade edilen aşınma oranının (ER) kabul edilebilirliğinin kontrolü için aşınma oranının gedik tabanı ile su seviyesi arasındaki yüksekliğe oranı kontrol edilmelidir. Bulunan bu oran $1,6 < (ER/H_b) < 21$ aralığında olmalıdır.



Şekil 1. Gedik değişkenleri [23]

Bu çalışmada Eş. 2.5 ve 2.6'da verilen Froehlich ampirik bağıntıları seçilerek hesaplanan tahmini gedik parametreleri, HEC-RAS programında tanımlanarak farklı yıkılma senaryoları ile çalışılmıştır. Burada Froehlich yaklaşımının seçilmesinin nedeni HEC-RAS programında gedik şev eğimlerinin değiştirilmesi suretiyle farklı senaryoların çalışılma imkanının olmasıdır. Suyun barajın üzerinden aşması sonucunda barajın yıkılma durumunda bir tane ve borulanma nedeniyle yıkılma durumunda dört tane olmak üzere oluşturulan toplamda beş farklı yıkılma senaryosu ile çalışılmıştır.

$$B_{ort} = 8,239K_0 V_w^{0,32} H_b^{0,04} \quad 2.5$$

Burada Bort ortalama gedik genişliği olup borulanma olması durumunda $K_0=1,0$, suyun barajın üzerinden aşması durumunda ise $K_0=1,3$ alınmaktadır. Gedik şev eğimleri ise borulanma için $Z_b(Y:D) = 0,7:1$, suyun barajın üzerinden aşması durumu için ise $Z_b(Y:D) = 1:1$ olarak alınmaktadır. Froehlich yaklaşımına göre gedik oluşum süresi t_f ise Eş. 2.6'da verilmiştir [22].

$$T_f = 3,664 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}} \quad 2.6$$

Tablo 1'de farklı baraj tipleri için kullanılan gedik parametreleri görülmektedir.

Tablo 1. Baraj yıkılmasında kullanılan gedik parametreleri [24]

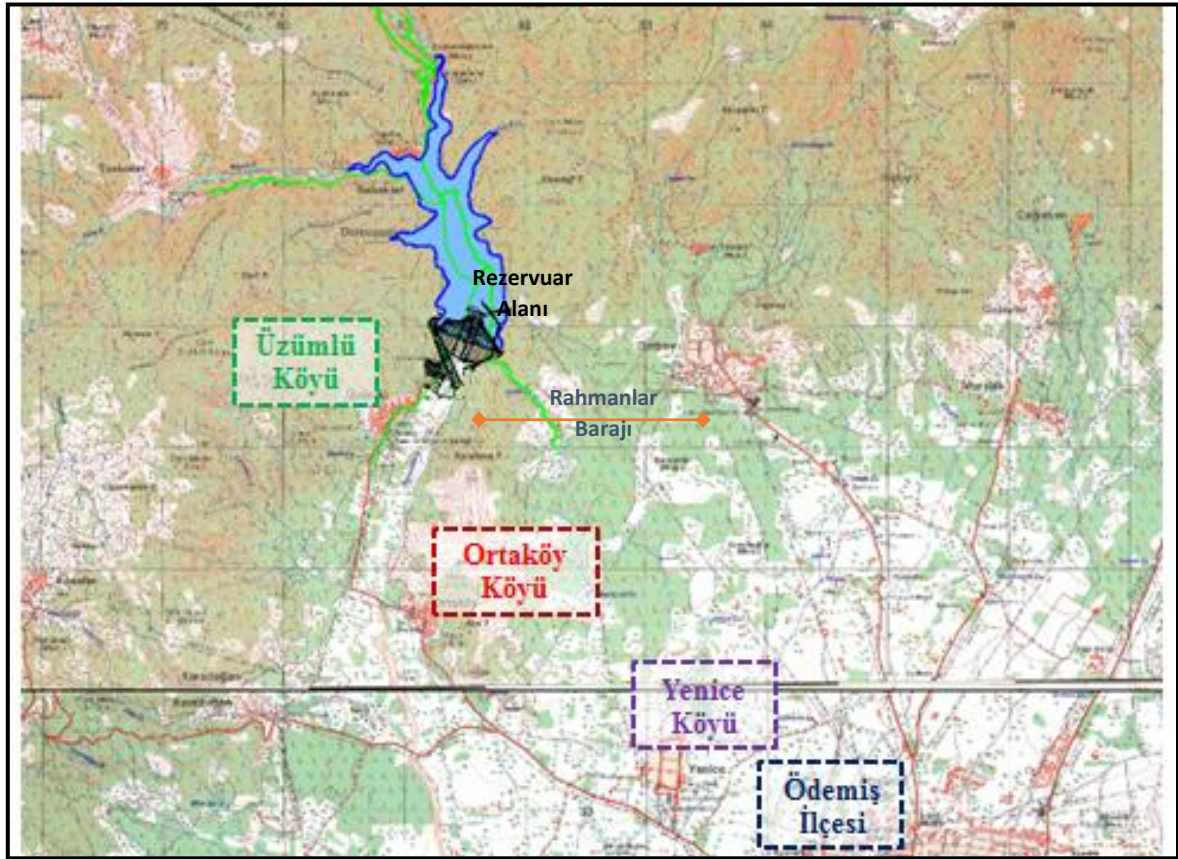
Gedik Parametreleri	Değerleri	Baraj Tipi
Ortalama gedik genişliği (B_{ort})	$0,5 H_d < B_{ort} < 3H_d$	Toprak, kaya dolgu
	$B_{ort}=0,8 \cdot \text{kret uzunluğu}$	Cüruf, zayıt dolgu
	$B_{ort}=\text{kret uzunluğu}$	Beton, kemer
Gedik şev eğimleri (1:Z)	$0 < Z < 2$	Hepsi
	$Z=0$	Yığma, ağırlık
	$0,25 < Z < 2$	Toprak, kaya dolgu
	$1 < Z < 2$	Cüruf, zayıt dolgu
Yıkılma süresi (saat)	$0,1 < t_f < 3,0$	Hepsi
	$0,1 < t_f < 0,3$	Yığma, ağırlık, cüruf, zayıt dolgu
	$0,1 < t_f < 0,5$	Dolgu, tasarlanmamış, zayıf inşa edilmiş
	$0,3 < t_f < 3,0$	Dolgu, tasarlanmış, sıkıştırılmış

3. RAHMANLAR BARAJI UYGULAMASI (APPLICATION TO RAHMANLAR DAM)

3.1. Pilot Bölge ve Mevcut Baraj Bilgileri (Information about Pilot Area and Existing Dam)

Proje alanı, Türkiye'nin batısında, İzmir İli'nin 120 km güneydoğusundaki Ödemiş İlçesi'nin yaklaşık 6 km kuzeybatısında yer alan Üzümlü köyünün doğusunda akan Rahmanlar Deresi üzerinde bulunmaktadır (Şekil 2). Rahmanlar Barajı Ege Bölgesi'nde İzmir İli sınırları içinde yer alan Küçük Menderes nehrinin su potansiyelinin değerlendirilerek ekonomiye kazandırılması amacıyla 2001 yılında planlama çalışmaları tamamlanarak DSİ Genel Müdürlüğü Etüt ve Planlama Dairesi Başkanlığı tarafından tasdik edilmiş olan sulama ve içme suyu temini amaçlı "Küçük Menderes Projesi" kapsamında yer almaktadır. Proje akım yönünde 110 km uzunluğundadır. Rahmanlar Barajı gövde tipi ön yüzü beton kaplı, dolgu bir baraj olarak tasarlanmıştır. Temelden yüksekliği 92,30 m ve talvegden yüksekliği 75 m olan gövde, kum çakıl malzemeden ve mansabında kaya dolgu zonundan oluşmaktadır. Gövdede geçirimsizlik memba yüzündeki beton kaplama ile sağlanmaktadır. Beton kaplama altındaki iki adet filtre zonuna ek olarak kret ortasından başlayıp memba yönüne 1: 1 (yatay:düşey) eğimle inen filtre tabakası yer almaktadır.

Rahmanlar Barajı yıkılma analiz modelinde öteleme uzunluğu yaklaşık 3,5 km olup, öteleme Rahmanlar Barajı aksından başlatılarak, mansapta yer alan risk altındaki Ortaköy'e kadar devam ettirilmiştir. Barajın mansabında yer alan Ortaköy ve Üzümlü köylerinde yaşayan halkın yanı sıra, bu alanda birçok tarım arazisi de risk altında bulunmaktadır. Ortaköy'den sonra vadi genişliği arttığından taşkın su derinliğinin düşeceği, dolayısıyla Yenice köyü yerleşimi ile Ödemiş İlçesi için taşkın riskinin oluşmayacağı düşünülmüştür. Tehlike altındaki bu köylerden Üzümlü 280 kişilik nüfusa sahip olup baraj aksından 1 km mansapta, Ortaköy ise 127 kişilik nüfusa sahip olup barajın yaklaşık 2,7 m mansabında yer almaktadır.



Şekil 2. Barajın rezervuar ve mansap haritası (1/25 000)

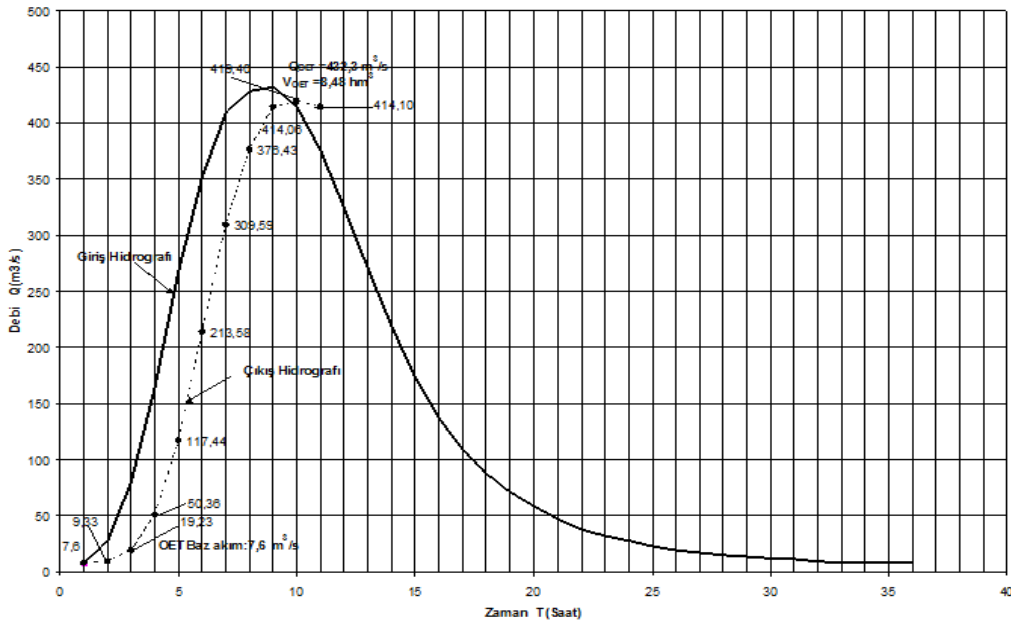
3.2. 1B Sayısal Modelleme (1D Numerical Modelling)

Su yüzü profillerinin tespit edilebilmesi için yapılan tek boyutlu hesaplamalar HEC-RAS hidrolik analiz programında gerçekleştirilmiştir. Buna göre göl alanı depolama alanı olarak oluşturularak modellenmiş ve gölde rezervuar depolama yöntemiyle öteleme yapılırken mansapta zamanla değişen akım denklemleri kullanılmıştır. Bu yöntemde program göl alanı ile baraj kesitinin arasında en az iki adet kesite ihtiyaç duyulmaktadır [25]. Zamana bağlı akım ötelenmesi esnasında bu kesitlerin su

seviyesi, göl alanının yıkılma anındaki su seviyesini temsil etmektedir. Dere yatağı boyunca akış yönüne dik olan düzlemde alınan kesitler baraj aksından başlayarak mansapta taşkın riski altında olan Ortaköy'e kadar devam ettirilmiştir. Bu çalışmada, baraj aksından alınan en kesitler Devlet Su İşleri Harita Müdürlüğü'nün hazırladığı 1/5 000 ölçekli topoğrafik haritalar kullanılarak, barajın mansabı boyunca alınan enkesitler ise Harita Genel Komutanlığından (HGK) alınan 1/25 000 ölçekli sayısal haritalar kullanılarak hazırlanmıştır. Dere güzergâhından alınan en kesitler sabit aralıklarla yerleştirilmiş ve numaralandırma mansaptan membaya doğru artan şeklindedir. Bu sebeple Rahmanlar Deresi üzerinden alınan en kesitler barajın membayında 3370 m ve mansabında 0 olarak adlandırılmıştır. Bir boyutlu baraj yıkılma simülasyonları yapılırken farklı Manning pürüzlülük değerleri için elde edilen su yüzü profilleri değerlendirildiğinde, taşkın haritasını etkileyebilecek farkların oluşmadığı görülmüştür. Bu nedenle hesaplarda tabanı oldukça düzenli, sahilleri düz ve sağlam, hiç bitki örtüsü olmayan yataklar için kullanılan 0,03 değeri kullanılmıştır [26].

Dolgu barajlarda gerçekleşen yıkılma süresi 6 dakikadan 3 saate kadar farklılık gösterebilmektedir. Yıkılma süreleri en çok barajın büyüklüğüne, kullanılan gövde malzemesine ve dolgunun yapısal dayanımına bağlıdır [20]. Bu nedenlerle çalışmada Rahmanlar Barajı yıkılma analizi için program kurulduğunda başlangıç ve bitiş süreleri ile otuz saniyelik hesap adım aralığıyla 1 Eylül 2014 saat 24:00'de başlayan simülasyon 6 Eylül 2014 saat 03:00'da sonlandırılmıştır. Baraj gövdesinde gedğin oluşumunun ise 3 Eylül tarihinde saat 06:00'da başladığı kabul edilmiştir.

Dere yatağı modellenirken taşkın öteleme için memba ve mansap sınır koşullarının da programda tanıtılması gerekmektedir. HEC-RAS programında dinamik akım koşullarında su yüzü profilleri hesaplanırken Şekil 3'te verilen katastrofik taşkın hidrografi memba sınır koşulu olarak programa girilmiştir. Mansap sınır koşulu olarak, mansap kesitinin olduğu noktada normal akım derinliğine karşılık gelen taban eğimi okunarak programda tanımlanmıştır. Zamana bağlı akımın rezervuarda ötelenmesi, basit bir yöntem olan Level-Pool Öteleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Uzun olmayan ve giriş hidrografi zamana bağlı olarak hızlı bir şekilde değişmeyen rezervuarlarda uygulanabilir olan bu basit yöntemde Rezervuar Depolama Ötelemesi de denmektedir [21]. Bu yöntemde, su yüzünün rezervuarın genişliği boyunca aynı seviyede olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 3. Rahmanlar Barajı olası en büyük taşkın debisinin hidrografi [18]

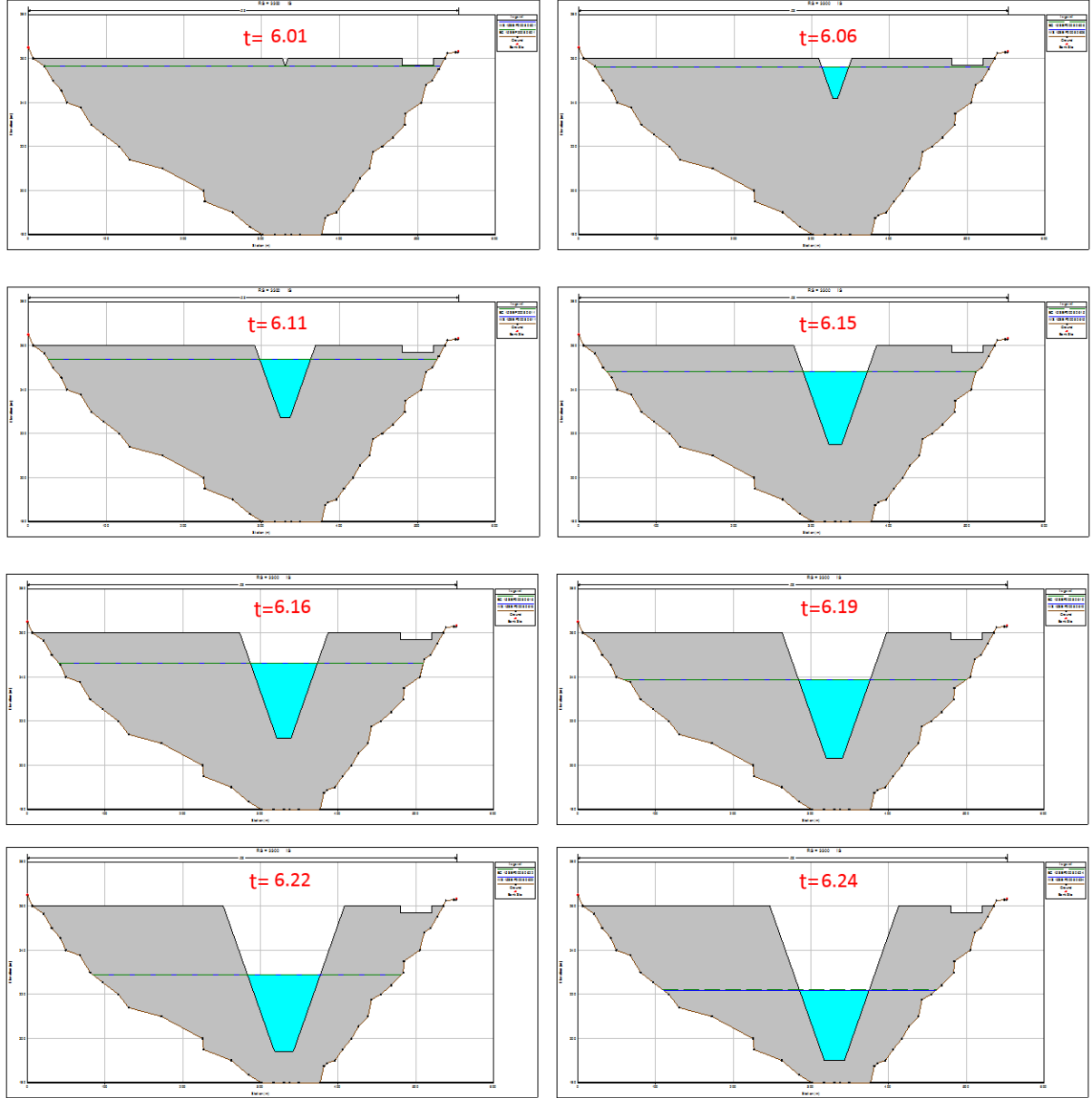
4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tablo 2'de çalışmada belirlenmiş baraj yıkılma senaryoları, elde edilen sonuçlar ile bunların değerlendirilmeleri görülmektedir. Çalışmada HEC-RAS yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda her kesitteki maksimum su seviyesi, çıkış debisi, çıkış hidrografi, maksimum akım

ve maksimum su seviyesinin gerçekleştiği zamanlar belirlenmiştir. Gövdede oluşan gedikten çıkan suyun kesitlerde oluşturduğu maksimum derinlikler tüm senaryolar için ayrı ayrı bulunmuştur [18].

4.1.1. HEC-RAS baraj yıkılma sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 4'te HEC-RAS programında suyun barajın üzerinden aşması, Şekil 5'te ise borulanma durumunda baraj gövdesinde yıkılmanın gelişmesi görülmektedir.



Şekil 4. HEC-RAS programında suyun barajın üzerinden aşmasıyla yıkılmanın gelişimi

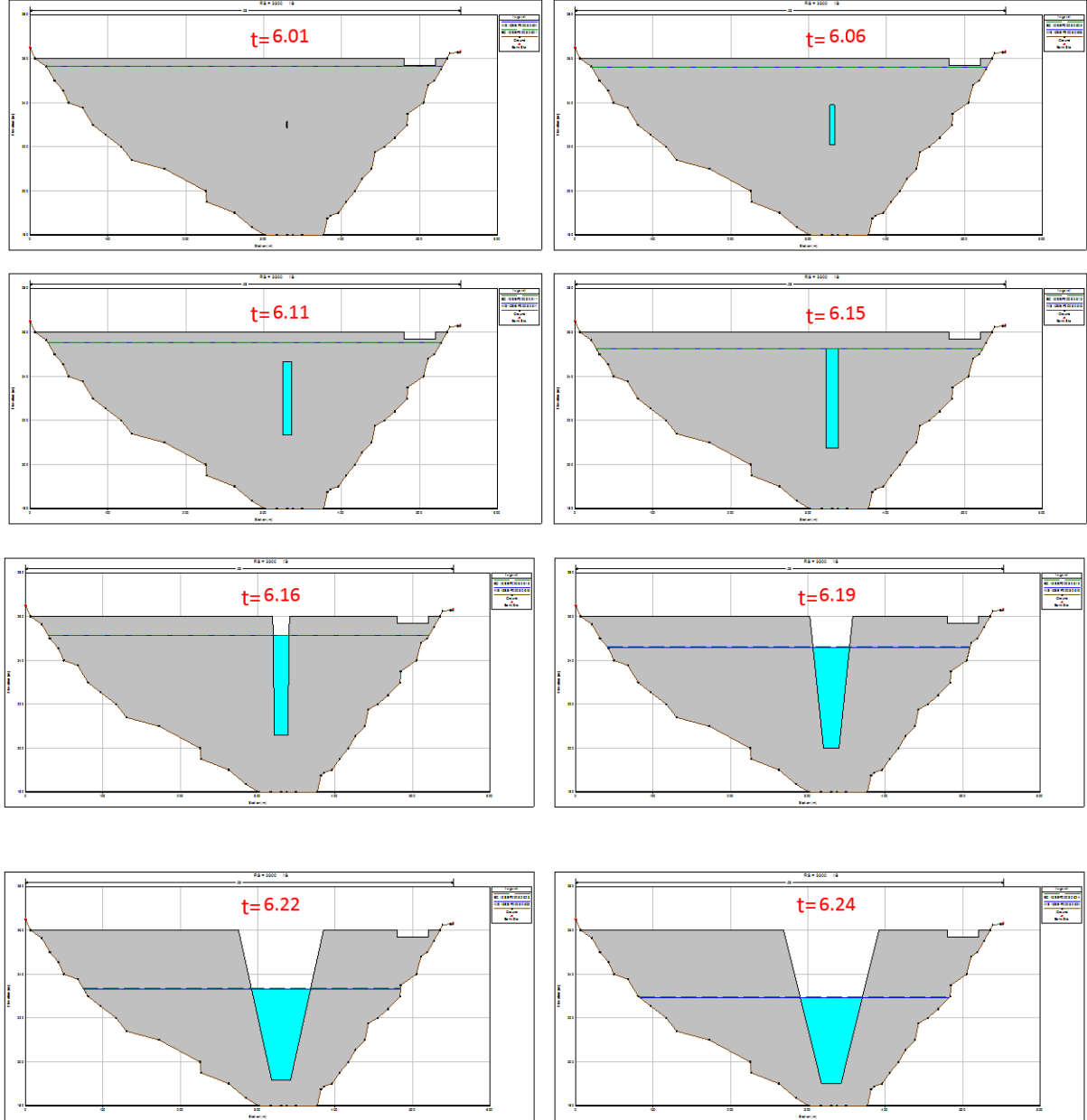
Tablo 2. [22] yöntemine göre belirlenen yıkılma senaryoları [18]

Parametre	Senaryo No.1		Senaryo No.2		Senaryo No.3		Senaryo No.4		Senaryo No.5	
	Üzerinden aşma		Borulanma		Borulanma		Borulanma		Borulanma	
H_w (m)	66,40 m		66,40		66,40		66,40		66,40	
V_w (hm ³)	24,00		24,00		24,00		24,00		24,00	
A_s (km ²)	0,84		0,84		0,84		0,84		0,84	
K (m)	12,00		12,00		12,00		12,00		12,00	
H_b (m)	70,00		70,00		70,00		70,00		70,00	
Z_u	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$
Z_d	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$	1,8	$Z(Y):I(D)$
Z_b	1	$Z(Y):I(D)$	0,7	$Z(Y):I(D)$	0,8	$Z(Y):I(D)$	0,9	$Z(Y):I(D)$	1	$Z(Y):I(D)$
t_f	0,39		0,39		0,39		0,39		0,39	
B_{ort} (m)	95,68		73,58		73,58		73,58		73,58	
B_b (m)	25,66		24,60		17,59		10,61		3,60	
Sonuçların kontrolü										
$B_{ort}/H_b=$	1,37	> 0,6	1,05	>0,6	1,05	>0,6	1,05	>0,6	1,05	>0,6
$ER(B_{ort}/t_f)=$	245,32		188,66		188,66		188,66		188,66	
$ER/H_b=$	3,50	$1,6 < ER/H_b < 21$	2,70	$1,6 < ER/H_b < 21$	2,70	$1,6 < ER/H_b < 21$	2,70	$1,6 < ER/H_b < 21$	2,70	$1,6 < ER/H_b < 21$

Tabloda H_w = gediğin tabanından barajdaki su seviyesine olan yükseklik (m); H_b = gedik yüksekliği (m); t_f = baraj yıkılma süresi (saat); Z_u = barajın memba yüzü şev eğimi $Z(Y):I(D)$; Z_d = barajın mansap yüzü şev eğimi $Z(Y):I(D)$; Z_b = gedik şev eğimi $Z(Y):I(D)$; B_b = gediğin taban genişliği (m); B_{ort} = gedik ortalama genişliği (m); ER = aşınma oranı; K = kret genişliği (m); A_s = rezervuar yüzey alanı (m²) ve V_w = yıkılma anında rezervuardaki su hacmidir (m³).

Senaryo 1 için analiz sonuçları

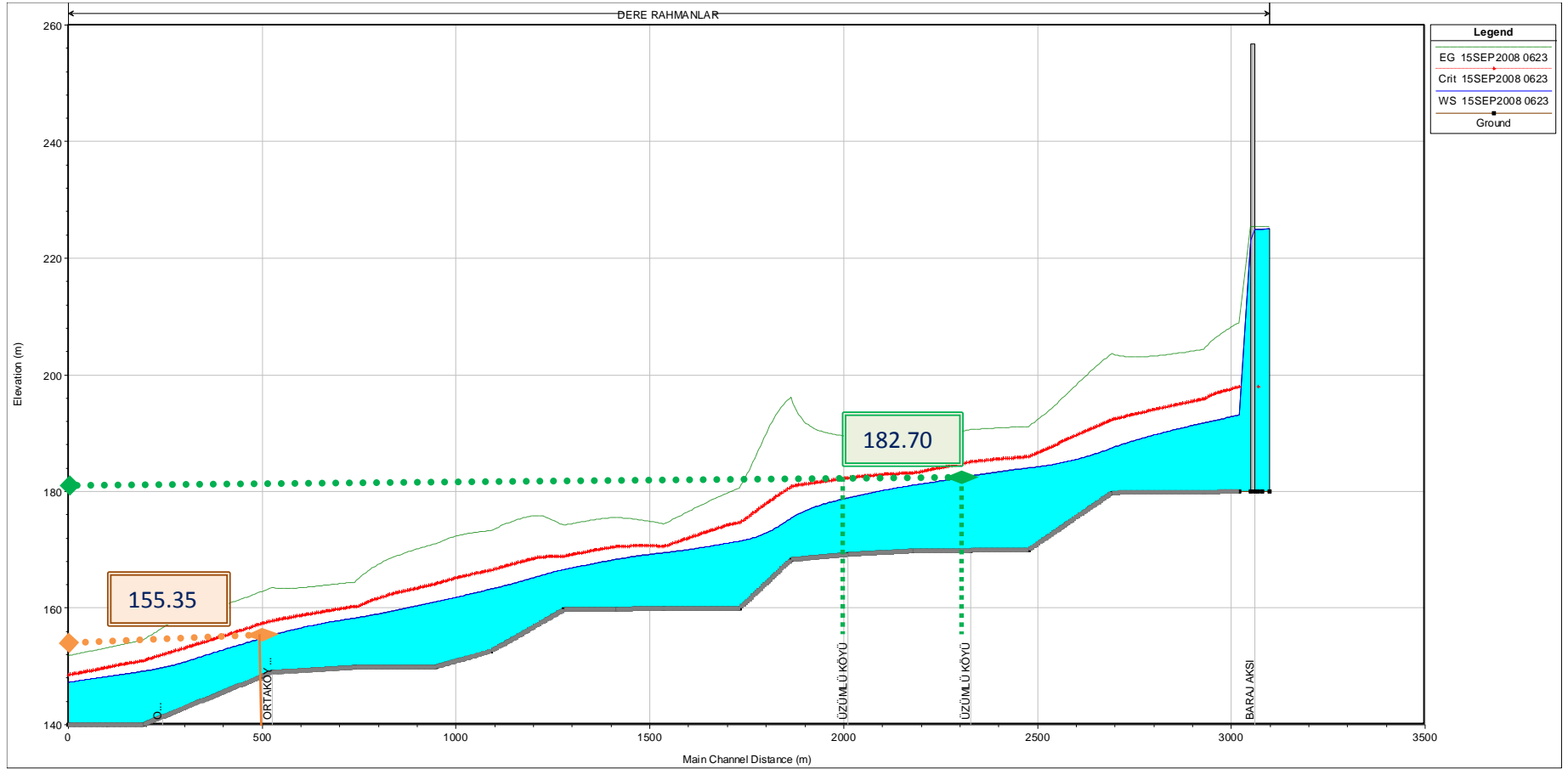
Rezervuardaki suyun 06:00 anında barajın üzerinden aşması ile gerçekleşen yıkılma analiz sonucunda, baraj mansabındaki kesitlerde maksimum derinlikler Ortaköy ve Üzümlü köyleri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Buna göre Üzümlü köyünde maksimum su derinliğinin yıkılma anından sonra 22. dakikada, Ortaköy’de ise 23. dakikada meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6’da Senaryo 1’de yıkılmadan 23 dakika sonraki su yüzü profili görülmektedir.



Şekil 5. HEC-RAS programında borulanma durumunda yıkılmanın gelişimi

Senaryo 2 için analiz sonuçları

Senaryo 2’de 06:00 anında borulanma ile gerçekleşen yıkılma analizinin sonuçları, baraj mansabındaki Üzümlü ve Ortaköy köylerinde maksimum derinliğin yıkılmadan sonra 23. ve 24. dakikalarda oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 6. Senaryo 1'e göre yıkılmanın ardından 06:23 anında gerçekleşen maksimum su yüzü profili

Senaryo 3 için analiz sonuçları

Senaryo 3'te 06:00 anında borulanma ile gerçekleşen yıkılma analizinin sonuçları, baraj mansabındaki Üzümlü ve Ortaköy köylerinde maksimum derinliğin yıkılmadan sonra 24. ve 25. dakikalarda oluştuğunu göstermektedir.

Senaryo 4 için analiz sonuçları

Senaryo 4'te saat 06:00 anında borulanma ile gerçekleşen yıkılma analizinin sonuçları, baraj mansabındaki Ortaköy ve Üzümlü köylerinde maksimum derinliğin yıkılmadan sonra 24. ve 25. dakikalarda oluştuğunu göstermektedir.

Senaryo 5 için analiz sonuçları

Senaryo 5'te saat 06:00 anında borulanma ile gerçekleşen yıkılma analizinin sonuçları, baraj mansabındaki Ortaköy ve Üzümlü köylerinde maksimum derinliğin yıkılmadan sonra 24. ve 25. dakikalarda oluştuğunu göstermektedir.

Tablo 3 ve Tablo 4'te farklı yıkılma senaryoları için barajın mansabında yer alan Ortaköy ve Üzümlü köylerinde elde edilen maksimum su seviyeleri ile mansapta ötelenen pik debinin büyüklükleri verilmiştir. Tablo 3'te görülen sonuçlarda beklenildiği üzere, baraj gövdesinde oluşan gedikten çıkan taşkın debisinin ötelenmesi sonucunda en mansaptaki kesitten çıkan taşkın pik değerinin küçüldüğü görülmüştür.

Tablo 3. 1B analizler sonucu köylerde oluşan su kotları [18]

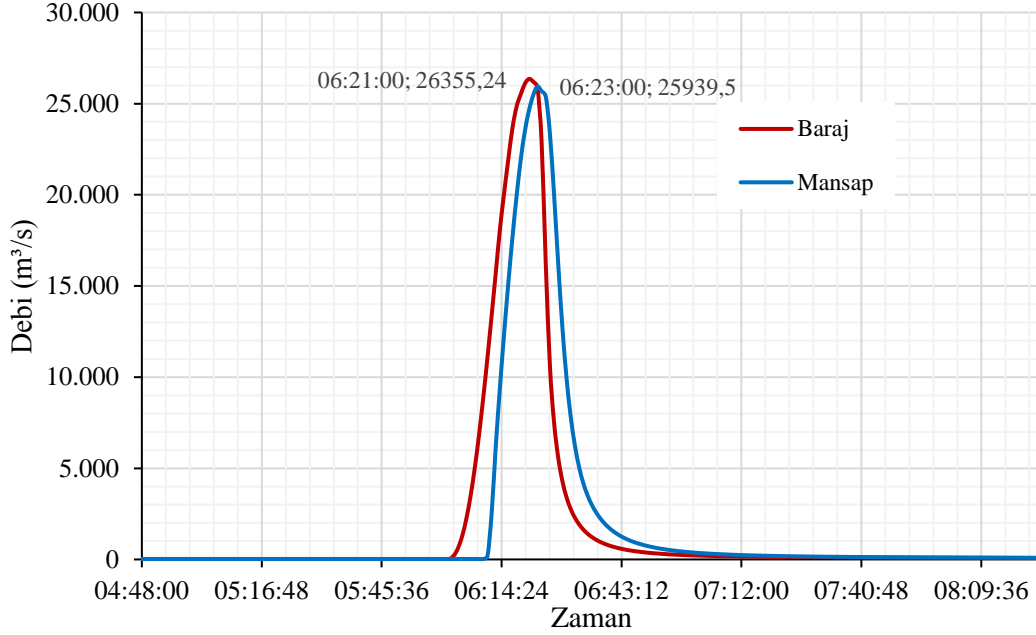
Senaryo No	Üzümlü Köyü	Ortaköy Köyü
Senaryo 1	182,7 m	155,4 m
Senaryo 2	183,3 m	155,4 m
Senaryo 3	183,6 m	155,8 m
Senaryo 4	183,9 m	156,0 m
Senaryo 5	184,5 m	156,2 m

Tablo 4. Baraj aksında ve mansapta oluşan pik debiler ve oluşma zamanları [18]

Senaryo No	Q (m ³ /s) baraj aksı	Q (m ³ /s) mansap kesiti	Pik debinin oluşma zamanı (saat:dk)
Senaryo 1	25816,32	25386,93	06:25
Senaryo 2	30202,86	29675,24	06:24
Senaryo 3	32034,63	29950,61	06:25
Senaryo 4	34335,05	31286,46	06:26
Senaryo 5	38799,90	33842,39	06:26

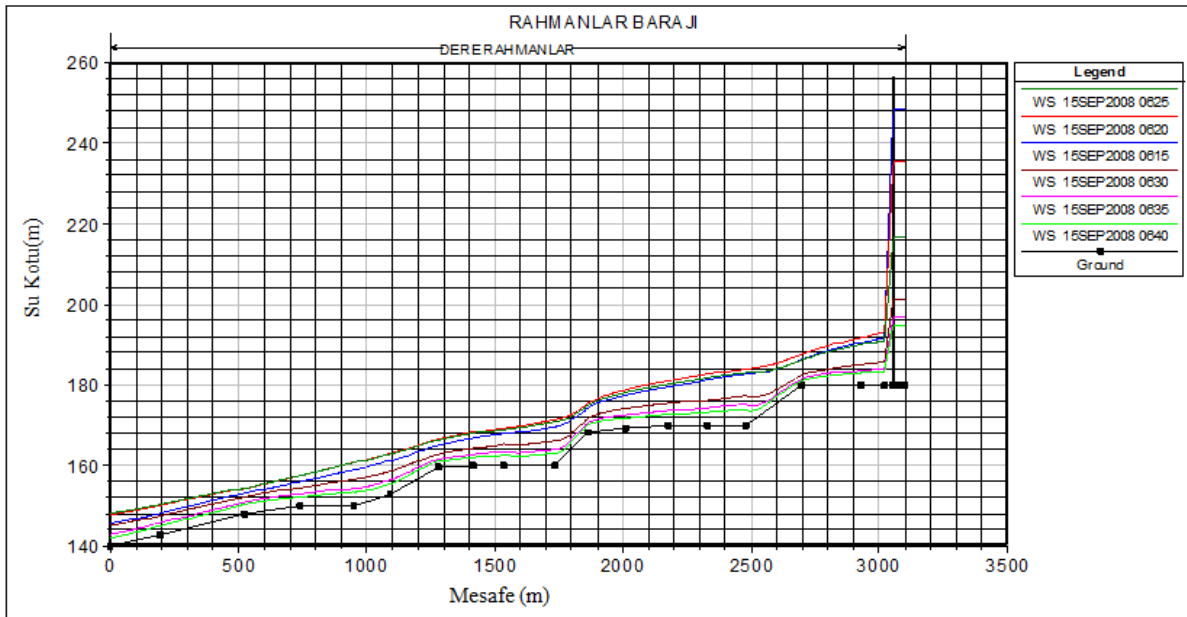
Şekil 7'de Senaryo 1 yıkılma senaryosu sonucunda dere yatağı üzerinde oluşan su yüzü profillerinin zamanla değişimi görülmektedir. Burada yıkılma öncesi (saat 06:15 anında-rezervuar dolu durumdayken) ve yıkılma sonrası farklı zamanlarda, mansap boyunca su yüzü profilleri çizilerek dalga hareketinin oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 7). Böylece baraj yıkılması sonucu oluşan taşkının mansapta hangi zamanda hangi su yüksekliğine neden olacağı grafikler yardımıyla belirlenebilmiştir.

HEC-RAS yazılımı kullanılarak Rahmanlar Barajı'nın farklı senaryolar altında yıkılması sonucu oluşan taşkın hidrografları hesaplanmış ve çıkan hidrograflar barajın mansabında yaklaşık 3,5 km'lik mesafe boyunca ötelendiği tespit edilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de verilen grafiklerde Senaryo 1'e göre barajın yıkılması sonucu, baraj aksında (km: 3300) elde edilen taşkın hidrografı ile öteleme mesafesinin sonundaki kesitten (km: 290) çıkan akım hidrografları görülmektedir. Diğer kesitlere ait hidrograflar ise bu iki eğrinin arasında yer almaktadır. Şekiller incelendiğinde hidrografların zamana göre bir miktar ötelenerek (=5 dakika) pik debi değerinin düştüğü ve hidrograf eğrisinin de çok az yayvanlaşma olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Baraj aksında (km: 3300) ve mansap kesitinde (km: 290) taşkın hidrografı [18]

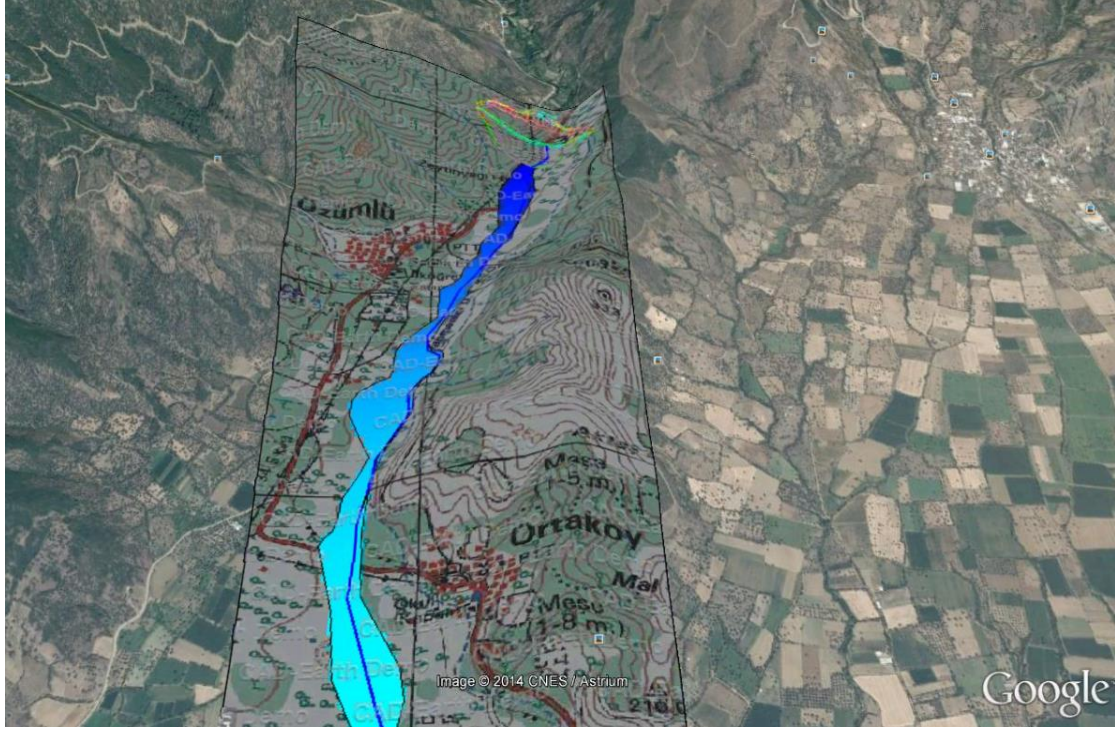
Şekil 8'de, Senaryo-1 sonucunda dere yatağı üzerinde oluşan su yüzü profillerinin zamanla değişimi görülmektedir. Burada yıkılma öncesi (06:15 anında-rezervuar dolu durumdayken) ve yıkılma sonrası farklı zamanlarda, mansap boyunca su yüzü profilleri çizilerek dalga hareketinin oluşumu gözlenmiştir. Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkının mansapta hangi zamanda hangi yükseklikte olacağı bu grafikler yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 8. Farklı zamanlardaki su yüzü profilleri [18]

4.1.2. Taşkın haritalarının oluşturulması

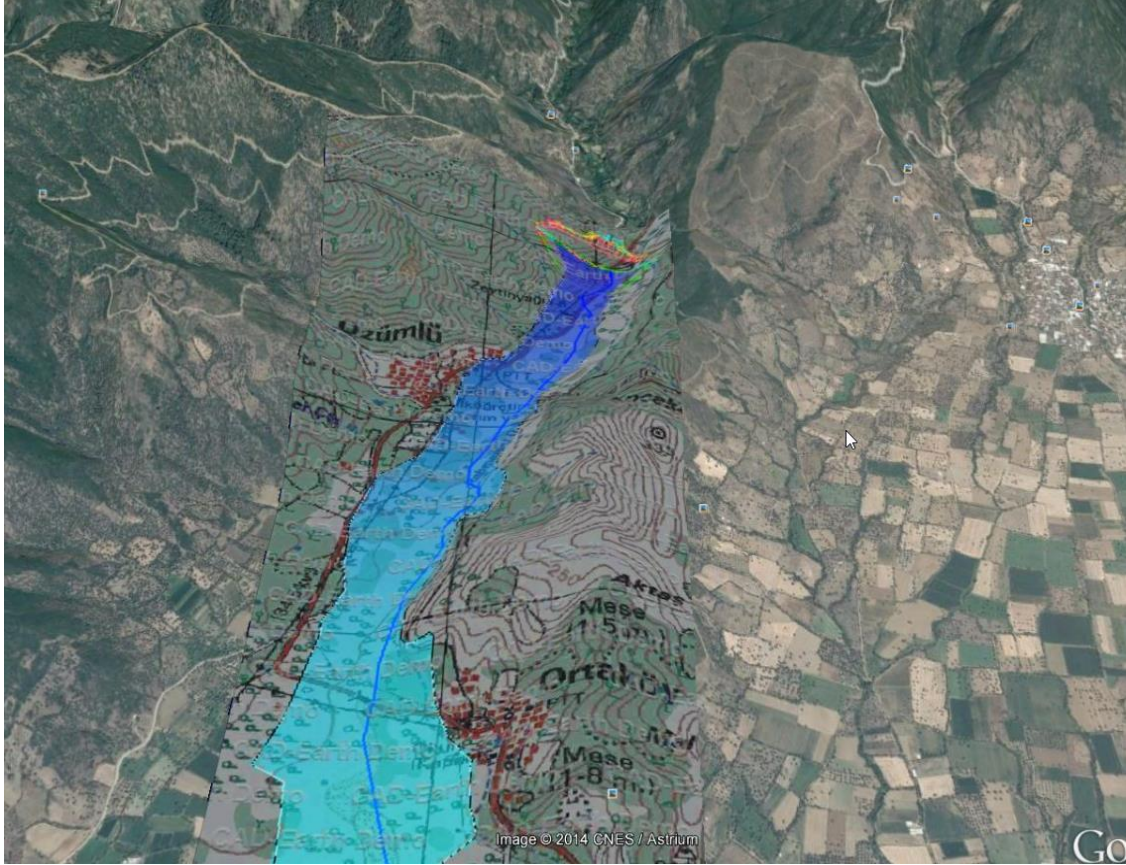
HEC-RAS programında gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda barajın mansabında oluşan taşkın haritası incelenmiştir. Buna göre Şekil 9'da yıkılma analizi öncesinde HEC-RAS programında gerçekleştirilen zamana bağlı akım analizi sonucunda barajın mansabında oluşan taşkın haritası, Şekil 10'da ise Senaryo 1 yıkılma analizi sonucunda mansapta oluşan taşkın haritası görülmektedir. Çalışmadaki senaryolar durumunda oluşan maksimum su yükseklikleri arasında en büyük fark yaklaşık 1 metre olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. Yıkılma öncesinde gerçekleştirilen dinamik taşkın analizi sonucu oluşan taşkın haritası

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında İzmir'in Ödemiş ilçesi'ndeki Rahmanlar Barajı yıkılması ve olası taşkın dalgası yayılımı modellenmesinde 1B analizler için HEC-RAS yazılımı kullanılmıştır. Analizler sonucunda Rahmanlar Barajı'nın farklı senaryolarla yıkılması sonucu oluşan taşkın hidrografları belirlenmiş ve çıkan hidrografların barajın mansabında yaklaşık 3.5 km mesafe ötelendiği görülmüştür. Saint Venant eşitliğine dayanan 1B zamanla değişen analizlerde suyun tek boyutta ilerlediği varsayıldığından akım dağılımı, kesit şekli, akış yönü veya akımın diğer 2B ve 3B özelliklerindeki değişimleri modelde başarılı bir şekilde ifade edebilmek mümkün olamamaktadır. Belli aralıklarla alınan kesitlerle temsil edilen dere yatağında, akımın doğrusal bir şekilde ilerlediği varsayılmakta, ancak akımı ve araziye gerçeklikten uzaklaştıran bu varsayımlar sayesinde analizler, 2B ve 3B analizlere kıyasla çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ücretsiz erişimi, kolay kurulumu ve kısa hesaplama süresi gibi nedenlerle Türkiye'de mevcut veya projelendirme aşamasında olan barajların mansap güvenliği ile ilgili çalışmalar yapılırken çalışmanın önem ve aciliyet durumuna göre öncelikle 1B yıkılma analizlerinin gerçekleştirilip sonuçların değerlendirilmesi, sonrasında öncelikle 2B analizlerin yapılması ve gerekli görülmesi halinde 3B analizlerin yapılması önerilmektedir.



Şekil 10. Senaryo 1 yıkılma analizi sonucunda mansapta oluşan taşkın haritası

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C.V. Bellos, J.V. Soulis, and J.G. Sakkas, Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30:1 (1992) 47 - 63.
- [2] S.W. Bell, R.C. Elliot, and M.H. Chaudhry, Experimental results of two dimensional dam-break flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30:2 (1992) 225 - 252.
- [3] G. Lauber, and W.H. Hager, Experiments to dam-break wave: sloping channel. *Journal of Hydraulic Research*, 36:5 (1998), 761-773.
- [4] B. Nsom, K. Debiane, and J.M. Piau, Bed slope effect on the dam-break problem. *Journal of Hydraulic Research*, 38:6 (2000) 459-464.
- [5] S. Kocaman, ve H. Özmen Çağatay, Gedik Parametrelerinin Baraj Yıkılması Taşkın Dalgalarına Etkisi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18:1 (2003)17-34.
- [6] F. Aureli, P. Mignosa, and M. Tomirotti, Experimental modelling of rapidly varying flows on wet bed and in the presence of submersible obstacles, in: *Proc. River Flow, Naples, Italy*, vol. 2 (2004) 849 – 858.
- [7] S. Soares-Fraza, Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill. *Journal of Hydraulic Research*, 45:Extra Issue (2007) 19-26.
- [8] H. Özmen Çağatay, and S. Kocaman, Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5:4 (2011) 541-552.

- [9] J.A.Vasquez, and J.G.B. Leal, Two-dimensional dam-break simulation over movable beds with an unstructured mesh. In Ferreira RML, Alves ECTL, Leal JGAB, Cardoso AH (eds) Riverflow 2006, vol I, Taylor & Francis, Portugal, (2006) 1483–1491. ISBN:0-415-40815-6.
- [10] R.B. Minussi, and G.F. Maciel, “Dam break-problem-complete solution and shallow water approximation comparison”, In: Altınakar MS, Kökpinar MA, Aydın I, Kirkgoz S (eds) River flow 2008, vol 1, Proceedings International conference on Fluvial Hydraulics, Izmir, Turkey, (2008) 619–626,.
- [11] S. Kocaman, ve H. Çağatay, “Baraj yıkılması akımının analitik ve deneysel karşılaştırılması”, IV. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, Orhantepe, İstanbul, (2009) 77–87.
- [12] M.S. Guney, G. Tayfur, G. Bombar, and S. Elçi, Distorted physical model to study sudden partial dam break flows in an urban area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140:11 (2014) 05014006.
- [13] H. Özmen Çağatay, S. Kocaman, and H. Güzel, Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump. *Journal of Hydro-environmental Research*, 8 (2014), 304 - 315.
- [14] FEMA P-956. Living with Dams, Know Your Risks, 2013.
- [15] Z. Bozkuş, and A. Kasap, Comparison of Physical and Numerical Dam-Break Simulations. *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, 22 (1998) 429-443.
- [16] Z. Bozkuş, and İ. A. Güner, Pre-Event Dam Failure Analyses for Emergency Management, *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, 25 (2001) 627-641.
- [17] Z. Bozkuş, Afet Yönetimi için Baraj Yıkılma Analizleri, *İMO Teknik Dergi*, 15:4 (2004) 3335 - 3350.
- [18] N. Palamut, Baraj Yıkılma Analizi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2014.
- [19] Hydrologic Engineering Center. (HEC, 2008). HEC-RAS River Analysis System, User’s Manual, Ver. 4.1, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 2008.
- [20] E. Francis, and P. E. Fiegle, Embankment Dam Failure Analysis, Issues, Resolutions, and Research Needs Related to Dam Failure Analysis Workshop. Oklahoma City, Oklahoma, 2001.
- [21] D.L. Fread, Breach: An Erosion Model for Earthen Dam Failures. National Weather Service, Silver Springs, Maryland, 1991.
- [22] D.C. Froehlich, Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134:12 (2008) 1708-1721.
- [23] Guidelines For Dam Breach Analysis. State of Colorado Department of Natural Resources Division of Water Resources, Denver, Colorado, USA, 2010.
- [24] Wahl, T. L. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters – A Literature Review and Needs Assessment, DSO-98-004, Dam Safety Research Report, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, 1998.
- [25] D. M. Gee, Use of Embankment Erosion Models to Estimate HEC-RAS Dam Breach Parameters, Dam Safety 2009, ASCE-EWRI, Kansas City, MO, 2009, 17-21 .
- [26] V.T. Chow, Open channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.



3B Baskı İle Üretilen Seramik Vazolar

Sanver ÖZGÜVEN¹

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, Meram/KONYA

Öz

Bu çalışmada farklı geometrik biçimlerden yola çıkılarak tasarlanan ve üç boyutlu seramik yazıcı ile üretilen seramik vazoların tasarım ve üretim süreçleri incelenmektedir. Çalışmalar tasarlanırken, çıkış noktası olarak çokgenler ve parabolik biçimlerden yararlanılmıştır. Bilgisayar ortamında üç boyutlu hale getirilen bu biçimler, seramik malzemenin yapısal özellikleri de dikkate alınarak oluşturulmuştur. FDM yöntemi ile delta model üç boyutlu seramik yazıcıda üretilen bu tasarımlarda, farklı oranlarda renklendirilmiş porselen bünyeler ve %25 şamot içeren yüksek dereceli kil kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, seramik bir malzemenin tasarımında yaşanan sınırlılıklara değinilmiş ve baskı sırasında, malzemeden kaynaklı hatalara yer verilmiştir. Tasarım sürecinde kullanılan komutların, seramik yüzeylerde oluşturduğu farklı etkiler, ayrıca bilinçli ve bilinçsiz olarak ortaya çıkan hatalar, seramik formların karakteristik özelliklerinin ön plana çıkarılmasında oldukça önemlidir ve malzemenin plastik yapısını ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca seramiğin baskı sırasındaki davranışı göz önüne alınarak, bilinçli olarak yapılan tasarımsal hataların, yüzeyde oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Bunun yanında seramik vazoların taban kısımlarının ve yüzeylerinin üretiminde uygulanan farklı yöntemler araştırma kapsamında karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 11/05/2018
 Düzeltme: 25/12/2018
 Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

3B Yazıcı
 Seramik
 Dijital Sanat
 3B Baskı

Keywords

3D Printer
 Ceramics
 Digital Art
 3D Printing

3D Printed Ceramic Vases

Abstract

In this study, design and production processes of ceramic vases inspired with different geometrical shapes and produced with three-dimensional printers have been examined. When ceramics are being designed, polygons and parabolic forms were used as a starting point. These forms which are designed in three dimensions in a computer are formed taking into account the structural characteristics of ceramic materials. In these designs printed by delta model three dimensional ceramic printer with FDM method, colored porcelain in different amount and high fired clay which contains 25% of chamotte has been used. Within the scope of the study, the limitations of the design of a ceramic material and mistakes caused by the material were mentioned. The different effects of commands on ceramic surfaces in the design process, as well as conscious and unconscious mistakes are very important to bring the characteristics and plastic features of ceramic forms to the foreground. In addition, considering the behavior of ceramic in the printing process, the effects of design mistakes made consciously on the surface have been investigated. In addition to this, the different methods in the production of the bottom parts and surfaces of the ceramic vases were evaluated comparatively in the scope of the study.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

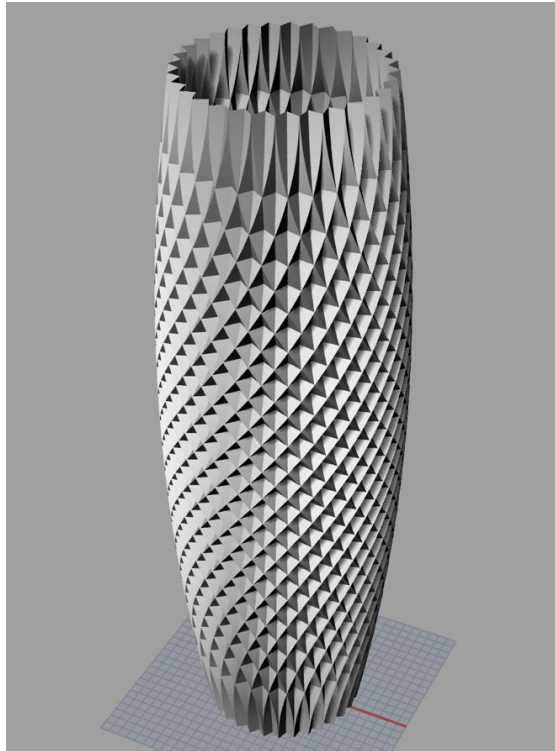
Malzemesi kil olan, farklı yöntemler ile şekillendirilebilen, pişirildiği zaman mukavemeti artan inorganik malzemelere genel olarak seramik adı verilir [1]. Seramik plastik yapısı sebebiyle elle kolay şekillendirilebilen bir yapıdadır. Aynı zamanda özellikle endüstriyel üretimlerde kalıpla şekillendirme yöntemi de uygulanmaktadır. Üç boyutlu yazıcı teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte tasarım ve el sanatları gibi alanlarda kullanılan kesme, birleştirme vb. geleneksel yöntem ve teknikler eskimiş hale gelebilir [2]. Son yıllarda gelişim gösteren bu teknolojilerle birlikte seramik objeler de üç boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilebilmekte ve birçok atölye ve sanatçı bu teknolojiyi geliştirme anlamında çalışmalar yapmakta ve projeler geliştirmektedir. Belli merkezlerde sürdürülen bu araştırmalar, alanında öncü nitelikte üretimlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Hala üzerinde çalışılmaya devam edilen bu

projelerin bazıları üniversitelerde akademik olarak sürdürülürken, bazıları da bağımsız araştırma grupları tarafından yönetilmektedir [3].

Seramik vazolar elle şekillendirme, kalıpla şekillendirme veya çamur tornasında şekillendirme gibi farklı teknikler kullanılarak da üretilmektedir. Elle şekillendirme ve çamur tornasında şekillendirme tekniklerinde doğrudan seramik kili kullanılarak şekillendirme yapılırken, alçı kalıp ve döküm yöntemi kullanılırken, öncelikle alçı modelin üretimi gerçekleştirilir. Sonrasında kalıp içine döküm yapılarak, istenilen, seramik vazo elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında üç boyutlu yazıcı ile üretilen seramik vazoların üretim süreçleri incelenmiştir. Süreç boyunca farklı yapıda ve pişirim aralığında seramik killeri kullanılarak, yine farklı derecelerde pişirimleri yapılmıştır. Bu objeler bilgisayar ortamında tasarlanırken, geometrik biçimler çıkış noktasını oluşturmuştur. Yer yer yapılan deformasyonlarda yine bu doğrultuda oluşturulan poligonların azaltılması ile farklı biçimler elde edilmiştir. Bunun yanında bazı seramik vazolar tasarlanırken, malzemenin plastik yapısını ortaya çıkarmak için belirli bir düzende ilerleyen, tasarımsal hatalar planlanmıştır. Ayrıca farklı oranda pigmentler ile renklendirilen porselen kili ile üç boyutlu baskı çalışmaları da yapılmıştır.

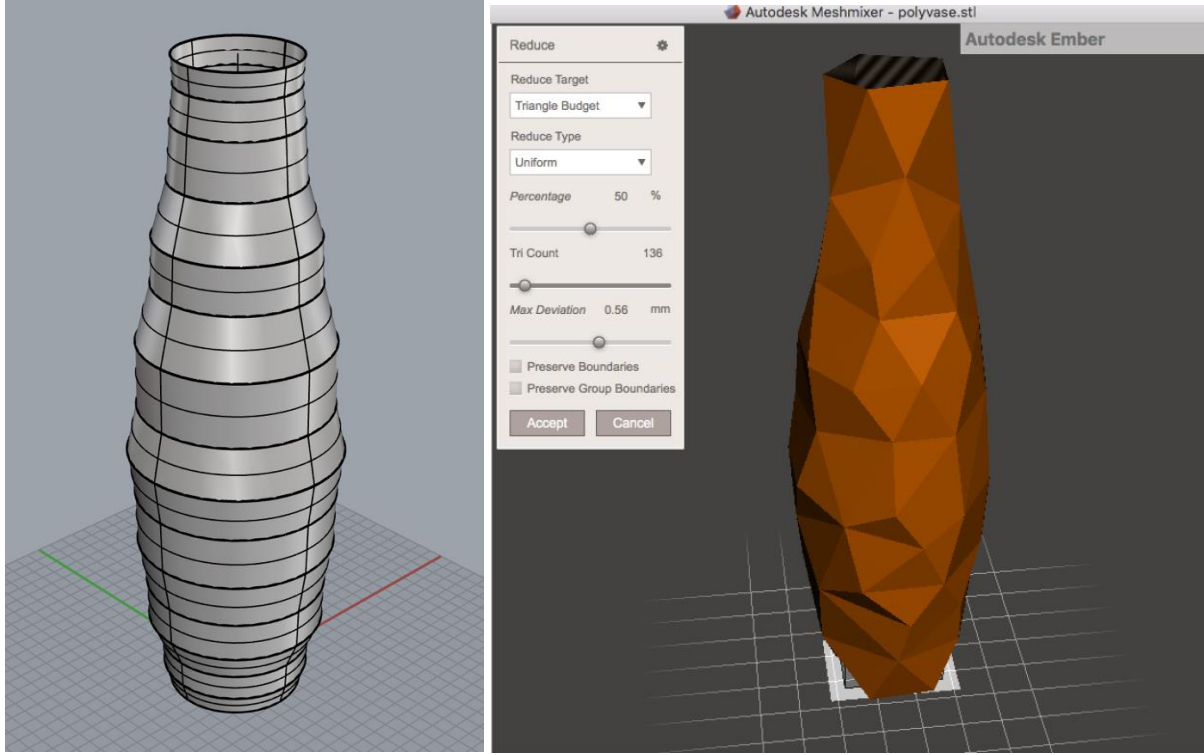
2. TASARIM (DESIGN)

Seramik vazoların tasarımında Rhinoceros 3D yazılımı kullanılmıştır. Vazoların taban kısımları için farklı çokgen biçimler kullanılmış ve “Extrcv” komutu ile katı hale getirilmiştir. 35 cm ve 40 cm uzunluğunda, farklı boylarda olan çalışmaların tabanları da 80 cm ile 100 cm çapında tasarlanmıştır. Son olarak “Twist” komutu uygulanıp, parça 45 derecelik açılarla deforme edilerek birbirinden farklı görüntüde seramik vazoların tasarımları tamamlanmıştır. Şekil 1’de görüldüğü gibi, tamamlanan çalışmalar STL uzantısında kaydedilmiş ve katman oluşturma işlemine geçilmiştir.



Şekil 1. Rhinoceros'ta yapılan seramik vazo tasarımı

Bazı seramik vazolarda Rhinoceros 3D ile katı model oluşturulduktan sonra Meshmixer yazılımı kullanılarak yüzey üzerinde deformasyon yapılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi, Rhinoceros’tan alınan STL uzantısı Meshmizer’da açılarak “Reduce Mesh” komutu uygulanmış, farklı yüzde değerleri verilerek vazonun yüzeyi deforme edilmiştir.



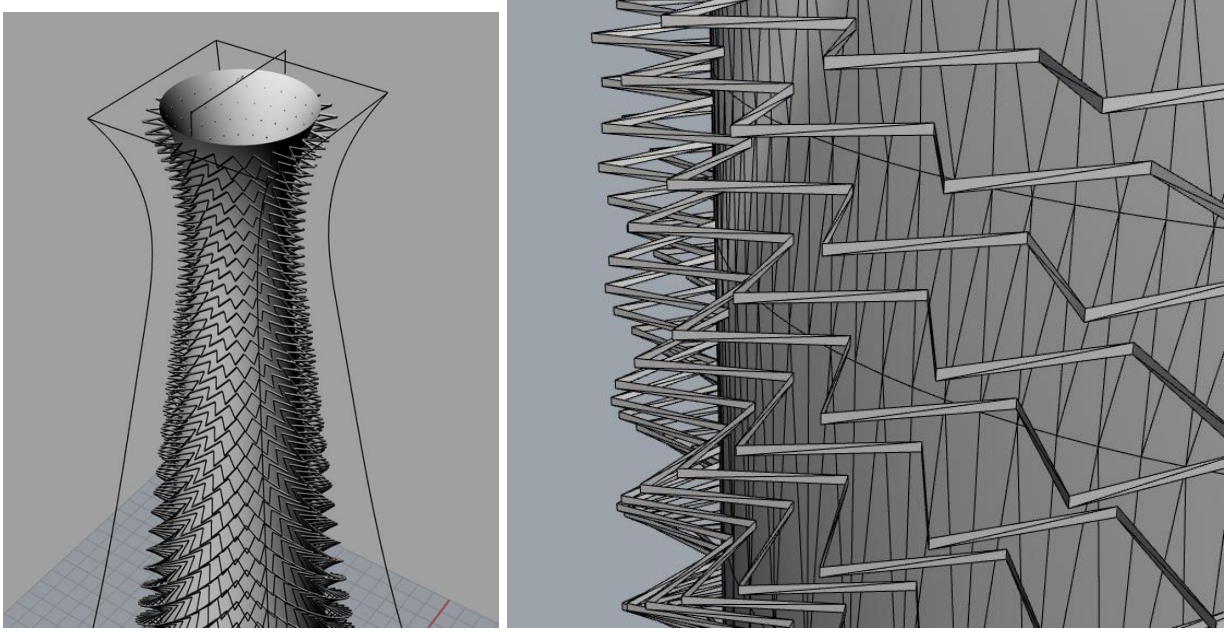
(a)

(b)

Şekil 2. Tasarımın deforme edilmesi a) Rhinoceros’ta yapılan seramik vazo tasarımı

b) Meshmixer’de poligonların azaltılması işlemi

Seramik vazoların tasarımında yüzey üzerinde farklı etkiler oluşturabilmek için, tasarım esnasında bilinçli olarak bazı hatalar uygulanmıştır. Bu tür hatalar seramik malzemenin baskı sırasındaki davranışlarının bilinmesinden nozulün istenilen yere gönderilmesini sağlamaktadır. Şekil 3’te görülebilen çalışmada yüzey üzerine çizilen üçgenler vazonun en alt kısmında 1 cm olarak belirlenmiş ve yukarı çıkıldıkça parçanın eğimi ile birlikte daraltılmıştır. Bu hareketler sürekli ve düzgün bir biçimde tekrarlandığında yüzey üzerinde uyumlu bir desen oluşturmaktadır. Gerek baskı öncesi tasarım aşamasında, gerekse baskı sırasında bu tür müdahaleler yüzey üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Bazı çalışmalarda yazıcının çalışması sırasında ekstrüdere veya tablaya müdahale edilerek, bilgisayarda yapılmış olan tasarımdan ve birbirinden farklı seramik çalışmalar ortaya konabilir. Ayrıca baskı esnasında kullanılan sesler ile ritmik hareketler oluşturularak, yazıcıya bu şekilde de müdahale edilebilmektedir [4]. Bunun dışında baskı esnasında, tasarımcının kontrolü dışında oluşan hatalarla da karşılaşılabilir. Bu tür hatalar veya “mutlu kazalar” yeni ilham kaynakları veya farklı yaratıcı düşünceleri ortaya çıkartabilir [5].

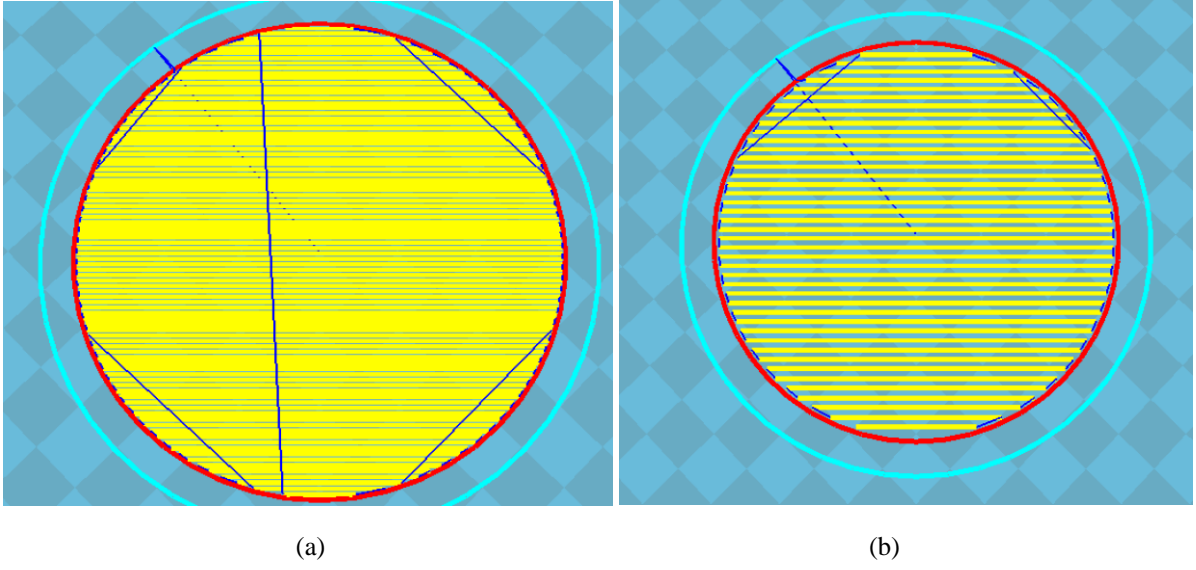


Şekil 3. Kontrollü hataların tasarımı

3. KATMANLARIN OLUŞTURULMASI (CREATING LAYERS)

Katman oluşturma işlemlerinde Cura yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan seramik baskılarda katmanlar arası mesafe en fazla 1 mm, en az 0.6 mm olarak belirlenmiştir. Baskı hızı bütün baskılar için 30 mm/s olarak belirlenmiştir. Vazoların taban kısımlarında 3 katman olacak şekilde değer girilmiştir. Daha önce yapılan uygulamalarda, 1 veya 2 katman şeklinde yapılan tabanların seramik malzeme için uygun olmadığı görülmüş, baskıdan sonra kuruma aşamasında taban kısımlarında çatlama ve dökülmeler gözlemlenmiştir. 4 veya 5 katman olarak yapılan taban baskılarında ise, pişme öncesi ve sonrası, herhangi bir çatlama ve dökülme görülmemiştir. Fakat hem baskının daha kısa sürede bitirilmesi, hem de fazla kalınlık oluşturmaması için 3 katmanlı bir tabanın seramik baskılarda yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. 1.8 mm çapındaki nozül ile, taban kısmı 3 katman olarak yapılan baskılarda pişme öncesi ve sonrası, seramik malzemenin özelliklerinden kaynaklanan herhangi bir hata görülmemiştir. Şekil 4’de farklı değerlerde oluşturulan katmanlar görülebilir.

Taban kısımların üç boyutlu baskısı yapılırken, katman sayıları doğru ayarlanırsa da baskı esnasında bazı problemler yaşanabilmektedir. Üç boyutlu baskıda kullanılan seramik killerin elle şekillendirme ile kullanılan killerden daha yumuşak olması nedeniyle bu hatalar görülebilmektedir. Bu problem daha sert ve plastik kıvamdaki kili itebilecek güçte bir ekstrüder ile çözülebileceği gibi, Cura yazılımında yapılan ayarlamalar ile de çözülebilmektedir. Cura’nın Basic bölümünde standart olarak bulunan değerler olan, Kabuk Kalınlığı (Shell Thickness) 1 mm ve Akış (Flow) %100, 1.8 mm çapındaki nozül ile birlikte uygulandığında, kabuk aralıkları çok yakın olmakta ve bir üst katmana geçildiğinde baskı bozulmaya başlamaktadır.



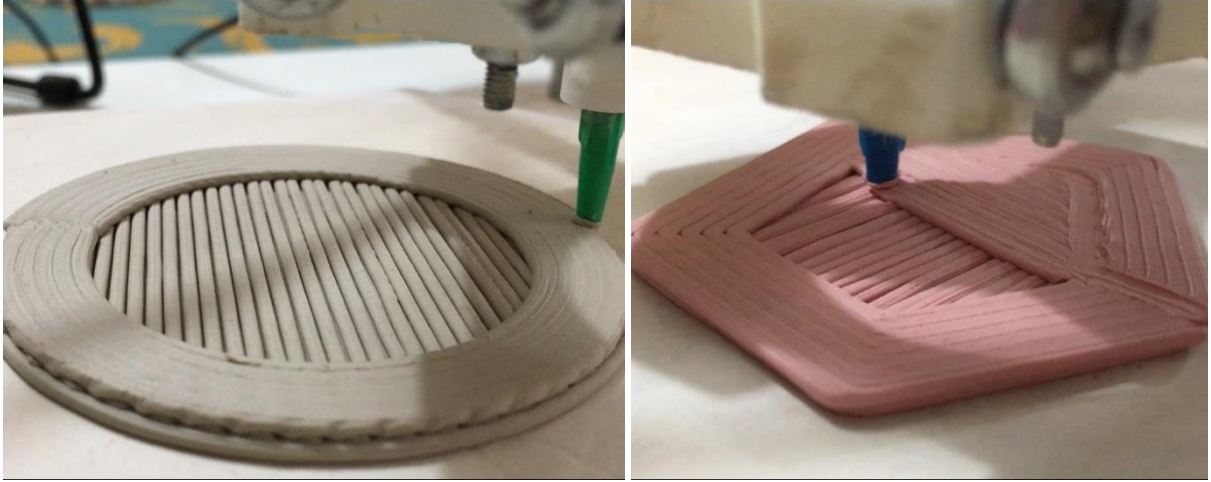
(a)

(b)

Şekil 4. Taban katmanlarının oluşturulması

a) Shell Thickness 1 mm b) Shell Thickness 2 mm

Çalışma kapsamında yapılan 3 boyutlu seramik baskılarda Kabuk Kalınlığı (Shell Thickness) 2 mm ve Akış (Flow) %60 olarak belirlenmiştir ve yukarıda belirtildiği gibi, en az 3 katman olarak taban kısmı basılmıştır. Bu değerlerde yapılan baskılarda iki çamur türü denenmiştir. Limoges porselen kili ve yüzde 25 oranında, 0-0.2 mm kalınlığında şamot içeren, Goerg&Schneider yüksek derece şamotlu kil ile yapılan çalışmalarda, taban kısımların baskısında herhangi bir problemle karşılaşılmanış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.



(a)

(b)

Şekil 5. Taban katmanlarının üç boyutlu baskısı

a) Şamotlu kil b) Renkli porselen kil

4. ÜÇ BOYUTLU BASKI (THREE DIMENSIONAL PRINTING)

Baskılar üç boyutlu delta seramik yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir seramik vazo için baskı süreleri, çalışmanın boyutuna bağlı olarak 1.5 – 2 saatte tamamlanabilmektedir. Hazırlanan çamur yoğunluğuna ve türüne bağlı olarak genellikle 2 – 4 bar arası bir basınçla, yazıcının ekstrüderi kil ile beslenmektedir.



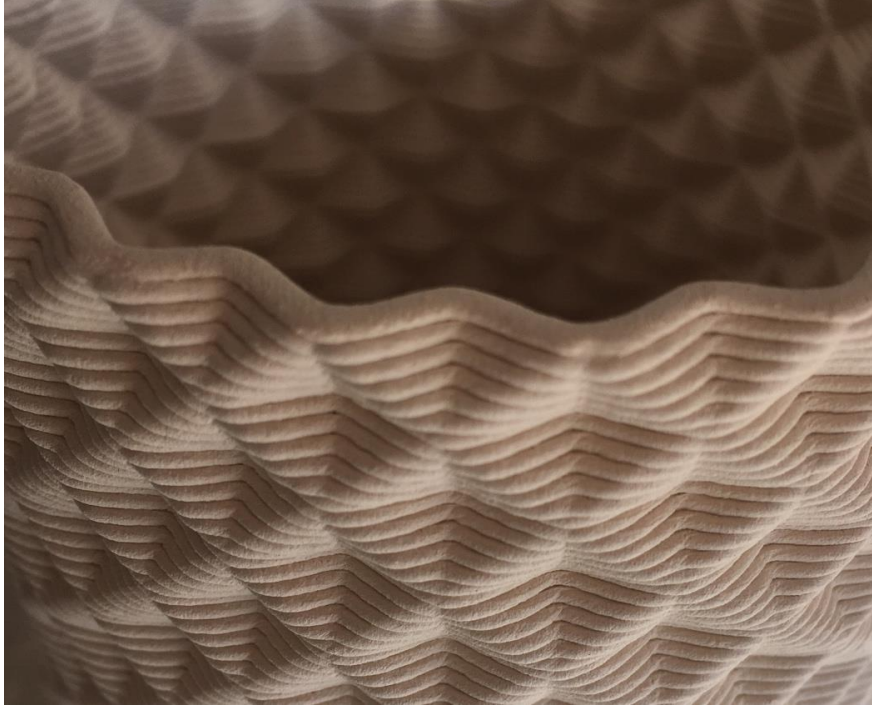
Şekil 6. Üç boyutlu baskı süreçleri



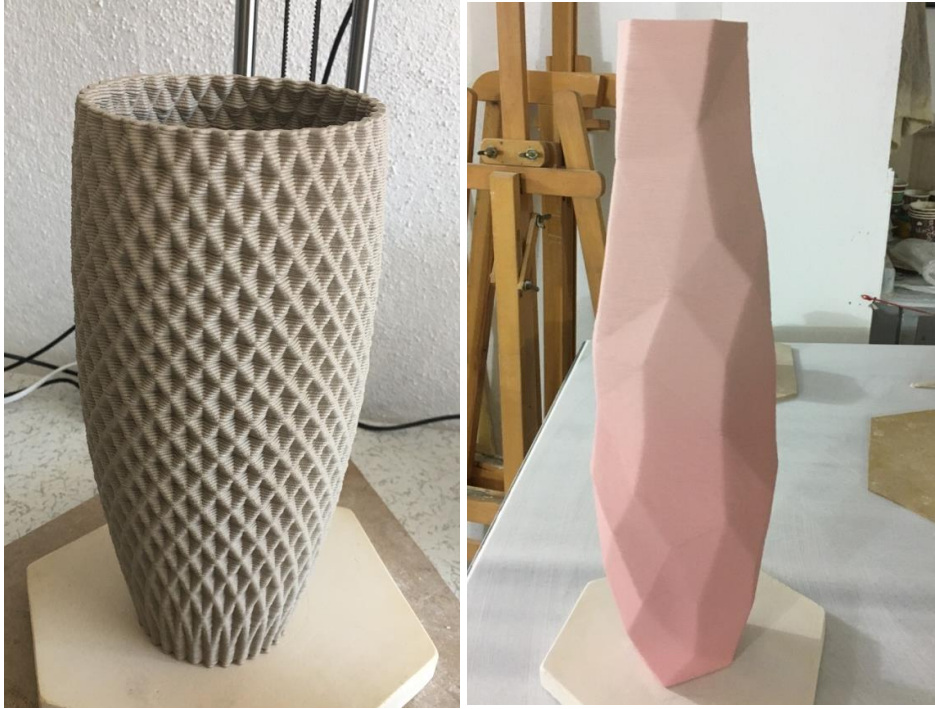
Şekil 7. Üç boyutlu baskı süreçleri

Üç boyutlu seramik yazıcılar gün geçtikçe daha güvenilir sonuçlar vermekle birlikte hala deneysel özelliklerini de korumaktadır. Bu baskılarda genellikle ana problem yerçekiminin etkilerinden kaynaklanmaktadır. Kili oluşturan dış kenarlar, kendi ağırlıklarının üst üste gelmesi sonucunda çökebilmektedir. Fakat bu tür problemler, kontrollü bir biçimde tasarlanıp uygulandığında, deneysel çalışmalara da olanak sağlamaktadır [6]. Bunun yanında kilin çok yumuşak olmaması da bu tür deformasyonları önlemektedir.

Şekil 6'da görülebildiği üzere, baskı boyunca üç taraftan fan yardımı ile kurutma yapılmış ve çamurun yumuşak kıvamından dolayı oluşabilecek deformasyonlar önlenmiştir. Üretilen üç boyutlu obje yükseldikçe daha iyi bir kurutma yapılabilmesi için, kurutucular da yükseltılarak kurutma işlemi üç boyutlu baskı süreci boyunca devam etmiştir. Kurutma işlemi Şekil 7'de görülen renklendirilmiş porselen ile yapılan baskı çalışmaları için de uygulanmıştır. Tasarım aşamasında Cura yazılımı ile oluşturulan katman aralıklarının seramik yüzeydeki etkisi Şekil 8'deki fotoğrafta detaylı olarak görülebilir. Renklendirilmiş porselen ve şamotlu kil ile yapılan baskılardan sonra vazolar kurumaya bırakılmıştır. (Şekil 9)



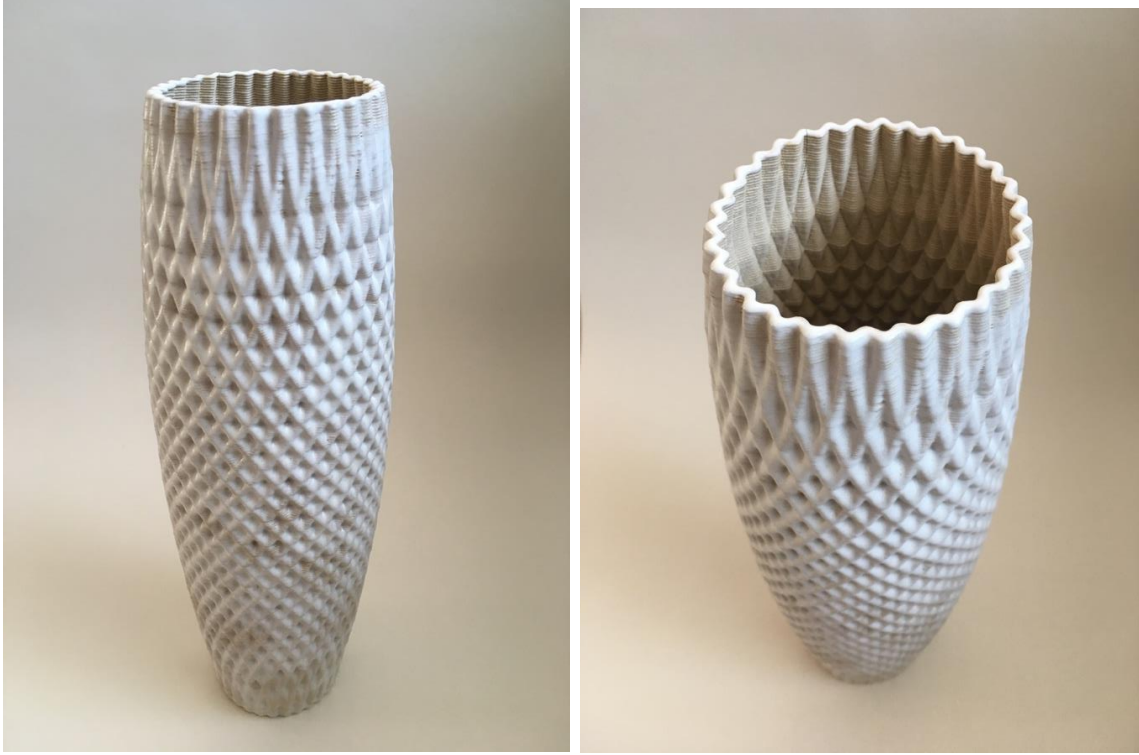
Şekil 8. Üç boyutlu baskı sonrası seramik yüzey



Şekil 9. Üç boyutlu baskısı tamamlanan çalışmalar

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Seramik baskılar kuruduktan sonra taban ve ağız kısımlarına nemli sünger ile rötuş yapılarak baskı sırasına oluşan ufak hatalar giderilmiştir. Daha sonra 980 °C derecede bisküvi pişirimi yapılmıştır. Şekil 10'da görüldüğü gibi bisküvi pişiriminden sonra, vazunun dış yüzeylerine fırça ile beyaz renkli sır uygulanmış ve 1230 °C derecede tekrar pişirilmiştir.



Şekil 10. Sır pişirimi yapılmış vazo, 30 cm x 8 cm

Üç boyutlu seramik baskıda kilin renklendirilmesi ile farklı renkte baskılar alınabilir. Bunun için öncelikle farklı oranlarda pigmentlerin bünye ile karıştırılması gerekmektedir. Renkli olarak üç boyutlu baskıları yapılan porselenlerde %2 oranında mavi ve kırmızı, %1 oranında da siyah pigment kullanılmıştır. 40 cm yüksekliğinde tasarlanıp, üç boyutlu baskıları gerçekleştirilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi, bisküvi pişiriminden sonra herhangi bir sır uygulaması yapılmadan 1230 °C derecede ikinci pişirimleri yapılmıştır.

Diğer bir üç boyutlu baskıda, çalışma üzerinde nozülün farklı hareketler yapması için tasarımda bazı değişiklikler yapılmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi, ilk başlarda yazıcının yaptığı bir hata olarak görünen bu hareketler belirli bir düzen içerisinde devam ettirilerek, yüzey üzerinde bir desen oluşturulması sağlanmıştır.



Şekil 11. Pişirimleri yapılmış porselen vazolar, 30 cm x 10 cm

Yüzey üzerine uygulanan kontrollü hatalar, porselen kilin plastik yapısı düşünülerek tasarlanmıştır. Vazonun en alt kısmında yapılan çıkıntıların mesafesi fazla olduğu için, çamur yüzey üzerine sarkmış, yukarı kısımlarda mesafe daraldığı için daha farklı etkiler oluşmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, seramik yüzeyler üzerinde farklı dokular elde etmek için sadece tasarımda yapılan farklılıklar değil, aynı zamanda katmanların oluşturulması sırasında yapılan sayısal değişiklikler de etkili olmuştur.



Şekil 12. Pişirimleri yapılmış porselen vazo, 30 cm x 12 cm

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Arcasoy, A. (1983). “Seramik Teknolojisi”, 1983, M.Ü., G.S.F.; Seramik Bölümü Yayınları No:1, İstanbul.
- [2] Özgündoğdu, A. F. (2014). Ceramics Technical. May-Oct 2015, Issue 40, p8-15. 8p.
- [3] Martinez, E. H. V., Can, Emre. (2016). Bilgisayar Destekli Seramik Üretim Yöntemi Olarak Üç Boyutlu Yazıcılar ve Günümüz Koşullarında Uygulama Örneği. Anadolu Üniversitesi Sanat & Tasarım Dergisi, 6(1),1-15.
- [4] <https://3dprint.com/119446/3d-printed-ceramic-sound/>
- [5] Davendorf, L. , Ryokai, K. “Being the Machine: Reconfiguring Agency and Control in Hybrid Fabrication”
Digital & Materials Fabrication, CHI 2015, Crossings, Seoul, Korea.
- [6] Ceramics Monthly. Feb2013, Vol. 61 Issue 2, p62-63. 2p.

The third International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry (3D-PTC2018) kongremizde sunulmuştur ve özet basılmıştır



Klasik ve Çapraz Akı Dağılımına Sahip Döner Yapıdaki Anahtarlamalı Relüktans Motorların Performans Karşılaştırması

Nurettin ÜSTKOYUNCU^{1,*}, Krishnan RAMU²

¹Erciyes University, Engineering Faculty, The Department of Electrical & Electronics Engineering, 38039, Melikgazi, Kayseri/ TURKEY

²Virginia Tech, The Bradley Department of Electrical & Computer Engineering, 24061, Blacksburg/USA

Öz

Yakın zaman içerisinde yapılan çalışmalarda, çapraz akı dağılımına sahip anahtarlamalı relüktans motorların (ÇARM), radyal akı dağılımına sahip klasik anahtarlamalı relüktans motorlar (KARM) ile kıyaslandığında yüksek güç ve tork yoğunluğuna sahip oldukları ifade edilmektedir. Sunulan çalışmada, KARM ile ÇARM'ler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. ÇARM'lerin yapılandırılmasında gereksinim duyulan ek mekaniksel bileşenler, motora ait stator ve rotor bloklarının oluşturulmasında kullanılan malzemeler, ilgili malzemelerin manyetik karakteristikleri ve bu malzemelerin kullanılması sonucu motorun boyutları, hacim ve ağırlığında meydana gelen değişiklikler dikkate alınmak durumundadır. Dairesel sargı konfigürasyonu gibi farklı sargı olasılıkları performans açısından farklılıklar oluşturabilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada, adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için KARM ve ÇARM yapıları eşit dış boyut, motor eksenel boyu ve manyetik akı yoğunluğu gibi kriterler ve bunun yanında benzer tork profilleri dikkate alınarak incelenmiştir. İncelenen makinaların performanslarının elde edilebilmesi için analitik hesaplamalar ile birlikte iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar metodları (SEM) kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, KARM'lerin ÇARM'ler ile kıyaslandığında aynı ya da daha iyi performans sergilediğini açık bir şekilde göstermektedir. Bununla birlikte KARM'lerin çok daha kolay bir şekilde yapılandırılabilmesi, ilgili motorları ARM yapıları içerisinde avantajlı olan bir yapı olarak ortaya koymaktadır.

Makale Bilgisi

Başvuru:23/07/2018

Düzeltilme: 24/10/2018

Kabul:13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Anahtarlamalı relüktans motor (ARM)
Çapraz akılı motor
Tork yoğunluğu

Keywords

Switched reluctance motor (SRM)
Transverse flux motor
Torque density

A Performance Comparison of Conventional and Transverse Flux Rotating Switched Reluctance Motors

Abstract

High power and torque densities have been claimed for transverse flux structures over the conventional (radial flux) switched reluctance machine (CSRSM) structures in recent publications. A comprehensive comparison between the transverse SRMs (TSRM) and CSRMs requires inclusion of the specific constructional requirements of the TSRM. Then it must take into account the back irons of the stator and rotor, the material for them and their magnetic characteristics, and their resulting impact on the outer machine dimensions, weight and volume. Performance differentiation that can accrue as a result of different winding possibilities such as hoop (circular) and concentric windings on the TSRM are also considered for the comparison. For a fair comparison of the two types of the SRMs, equal outer dimensions, stack length and magnetic flux density are assumed. In addition, similar torque profiles are also considered. Both analytical and 2D and 3D finite element methods (FEM) are employed in this research to determine the performance of the machines. The research results clearly indicate that CSRMs match or exceed the performance of the TSRMs. In combination with this fact that CSRMs are simpler to construct will make them the choice structure for the switched reluctance motor (SRM) kind.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM) sahip oldukları yüksek verim, sağlam yapı, sargı ya da mıknatıs içermeyen düşük maliyetli rotorları ve yüksek hata toleransları ile endüstriyel uygulamalar için oldukça iyi alternatiflerdendir [1-7]. ARM'leri de içeren klasik elektrik makinelerinin stator ve rotor kutuplarında akı radyal yönlü iken stator ve rotor arka demirlerinde ise dairesel yönlüdür. Çapraz akı dağılımına sahip anahtarlamalı relüktans motorları (ÇARM) da içeren çapraz akı dağılımlı makinelerde ise stator ve rotor kutuplarında akı radyal yönlü iken stator ve rotor arka demirlerinde ise eksenel yön söz konusudur. Literatürde yapılan çalışmalarda çapraz akı dağılımına sahip doğrusal ve döner yapıdaki ARM'lerin, KARM'ler ile kıyaslandığında daha yüksek kuvvet/tork ve güç yoğunluklarına sahip olduğu vurgulanmaktadır [8-15]. Aynı zamanda dairesel sargıya sahip ÇARM'lerin bu konuda ciddi avantaja sahip olduğu da belirtilmektedir [16-19]. Ancak ÇARM'lerin bazı yapısal problemlere ve boyutsal kısıtlamalara sahip olduğu da bilinmektedir [16-20]. Bu sınıktılara ilişkin yapılan bir çalışmada klasik yapıdaki doğrusal hareket gerçekleştiren ARM'lerin (DARM) çapraz akı dağılımına sahip DARM'ler ile kıyaslandığında daha uygun bir çözüm olduğu gösterilmiştir [21]. Bununla birlikte, ÇARM'lerin arka demirlerinin neden olduğu yapısal sınırlamalar ve bunun tork yoğunluğuna olan etkileri ile ilgili olarak önceki çalışmalarda yeteri kadar bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, ÇARM'lerin farklı özellikleri de dikkate alınarak kapsamlı bir karşılaştırma analizi yapılmıştır.

Yapılan çalışmada, literatürde yer almakta olan neredeyse tüm ÇARM yapıları dikkate alınmış ve bu yapılar ile eşdeğer nitelikteki KARM yapıları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların adil olarak yapılabilmesi adına öncelikle eşit maksimum akı yoğunluğu ve ardından da benzer tork profilleri için farklı açılardan değerlendirmeler yapılmış ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur. Analiz işlemleri, performans eşitliklerini temel alan analitik yöntem yanında iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi (SEA) temel alınarak gerçekleştirilmiştir. KARM'ler için iki boyutlu SEA (2B-SEA) kullanımı yeterli iken eksenel baskınlığı nedeni ile ÇARM'lerde üç boyutlu SEA (3B-SEA) kullanılmıştır. KARM'lere ait iki ve üç boyutlu SEA sonuçları arasındaki farkın önemli boyutlarda olmadığı da çalışmada gösterilmiştir.

Yapılan çalışmada, incelenen farklı ÇARM yapılarına ilişkin detaylar Bölüm 2'de verilmiştir. Çalışmada yer alan çapraz akı dağılımına sahip anahtarlamalı relüktans makineleri ve temel boyutsal ilişkileri ile karşılaştırma amaçlı olarak dikkate alınan KARM'ler Bölüm 3'te incelenmiştir. Bölüm 4'te performans eşitliklerinin türetilmesine ve karşılaştırma sonuçlarına yer verilmiştir. ÇARM'lerin arka demir yapıları ile bu yapıların performansları olan etkileri KARM'ler ile karşılaştırmalı olarak Bölüm 5'te sunulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar ise Bölüm 6'da özetlenmiştir.

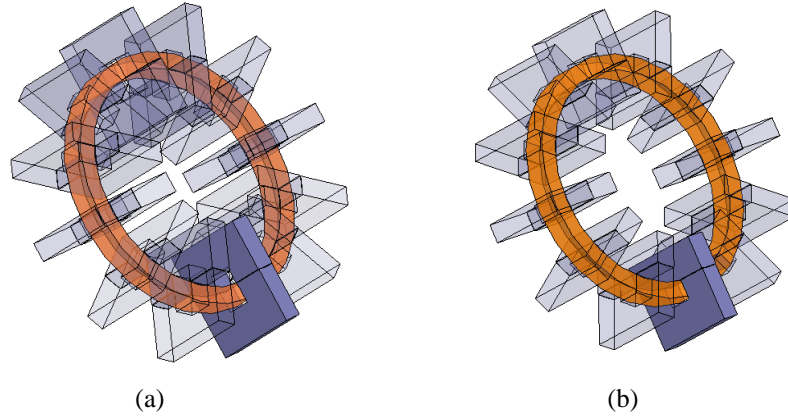
2. ÇARM YAPILARI (TSRM STRUCTURES)

Çapraz akı dağılımına sahip elektrik makineleri, radyal ve eksenel akı dağılımına sahip elektrik makinelerinin ortak bir nesli olarak gösterilebilir. Burada çalışmada kullanılan beş farklı ÇARM yapısı kısaca özetlemiştir.

2.1. Tip 1A ve Tip 1B ÇARM'ler (Type 1A and Type 1B TSRMs)

Tip 1A ÇARM'ler stator ve rotorlarında C şeklindeki saçlara sahiptirler ve Şekil 1(a)'da gösterildiği üzere bu stator bileşenleri dairesel bir eksenle yer almaktadır. Stator sargısı da daireseldir ve stator yarığında yerleştirilmiştir. Şekil 1(a), Tip 1A ÇARM'ye ait bir fazı göstermektedir ve çok fazlı motor, peşi sıra eksenel olarak bu fazların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır.

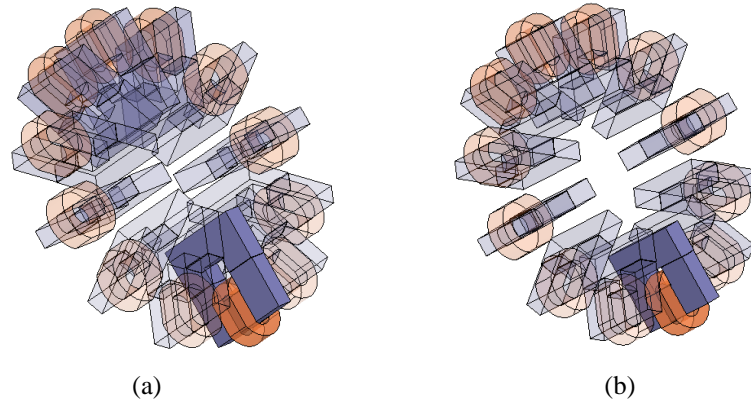
Bu makinanın sahip olduğu en büyük mekaniksel problem, C şeklindeki çekirdeğe sahip stator ve rotor bileşenlerinin bir arada tutulmasıdır. Bununla birlikte basit sargı yapısı ile stator ve rotor için düşük miktarda silisli saç kullanımı ilgili makinanın avantajlarındandır. Tip 1B ÇARM'de ise rotor saçlarının I şeklinde olması haricinde Şekil 1(b)'den görülebileceği üzere başka bir fark bulunmamaktadır.



Şekil 1. (a) Tip 1A, (b) Tip 1B ÇARM yapıları ((a) Type 1A, (b) Type 1B TSRM structures)

2.2. Tip 2A ve Tip 2B ÇARM'ler (Type 2A and Type 2B TSRMs)

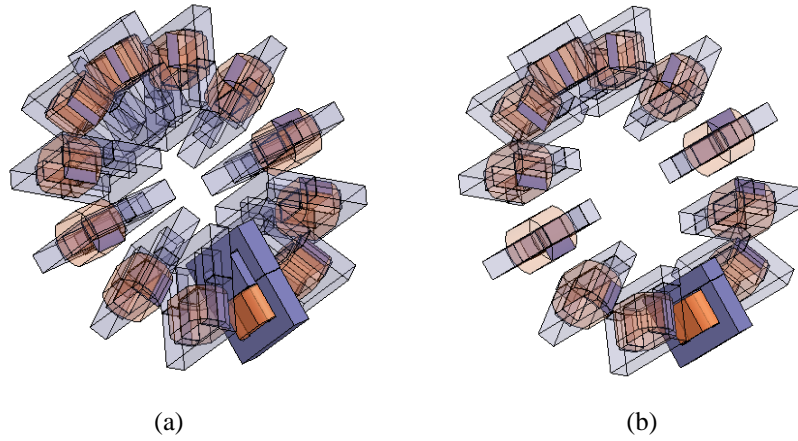
Tip 2A ve Tip 2B ÇARM yapıları, sargı yapısı haricinde sırasıyla Tip 1A ve Tip 1B ÇARM yapılarıyla aynıdır. Tip 2A ve Tip 2B ÇARM'lerde Şekil 2'den görülebileceği üzere her bir stator kutbunun kendi sargısı bulunmakta olup bu sargılar C şeklindeki stator bileşeninin arka demirinde yer almaktadır. Çok fazlı motor, Tip 1A ve Tip 1B motor yapılarında ifade edildiği üzere gerçekleştirilebileceği gibi eşit sayıda olmayan stator ve rotor kutup kombinasyonları ile KARM'lerde olduğu gibi de ortaya konabilir. Genel olarak, Tip 2A ve Tip 2B motorların üretim zorluğu Tip 1A ve Tip 1B ÇARM'ler ile benzerdir.



Şekil 2. (a) Tip 2A, (b) Tip 2B ÇARM yapıları ((a) Type 2A, (b) Type 2B TSRM structures)

2.3. Tip 3A ve Tip 3B ÇARM'ler (Type 3A and Type 3B TSRMs)

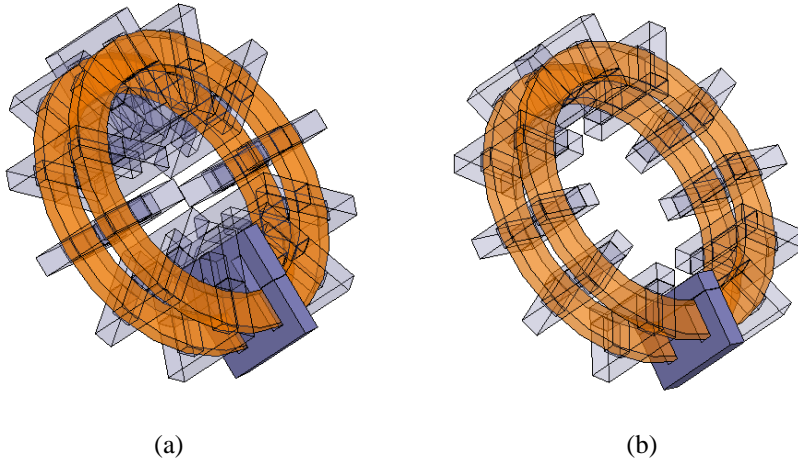
Tip 3A ve Tip 3B ÇARM yapıları, sırasıyla Tip 2A ve Tip 2B ÇARM yapılarında yer alan C şeklindeki stator çekirdeklerinin E şeklindeki çekirdeklerle yer değiştirmesi haricinde aynıdır. Şekil 3'ten görülebileceği üzere Tip 3A ve Tip 3B ÇARM rotorları sırasıyla E ve I şeklindeki çekirdeklere sahiptir. Eğer sargı, E şeklindeki stator çekirdeğinin orta bacağına yerleştirilecek olursa Tip 2A ve Tip 2B ÇARM'den farklı olarak sargı stator bileşenlerinin dışına taşmamaktadır. Tip 3A ve Tip 3B ÇARM'lerin mekaniksel yapılandırma problemleri daha önce sözü edilen diğer ÇARM'ler ile benzerdir.



Şekil 3. (a) Tip 3A, (b) Tip 3B ÇARM yapıları ((a) Type 3A, (b) Type 3B TSRM structures)

2.4. Tip 4A ve Tip 4B ÇARM'ler (Type 4A and Type 4B TSRMs)

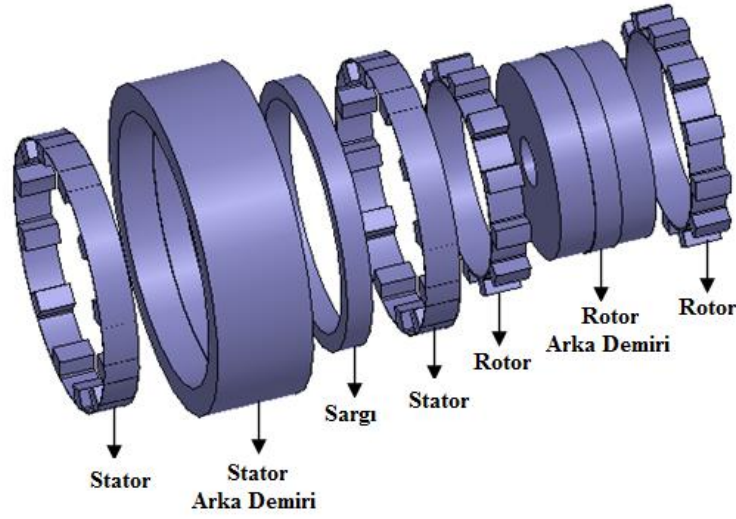
E şeklideki stator çekirdeklerine sahip ÇARM'ler gerek dairesel sargı gerekse de her bir stator çekirdeği için ayrı bir sargı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla Tip 4A ve Tip 4B ÇARM'ler sahip oldukları sargı yapıları haricinde Tip 3A ve Tip 3B ÇARM'ler ile çok benzerdir. Şekil 4'ten görülebileceği üzere Tip 4A ve Tip 4B ÇARM'ler, stator çekirdeklerinin ayrıkları ve arka demirleri içerisinde yer alan ikişer adet dairesel sargıya sahiptir.



Şekil 4. (a) Tip 4A, (b) Tip 4B ÇARM yapıları ((a) Type 4A, (b) Type 4B TSRM structures)

2.5. Tip 5 ÇARM (Type 5 TSRM)

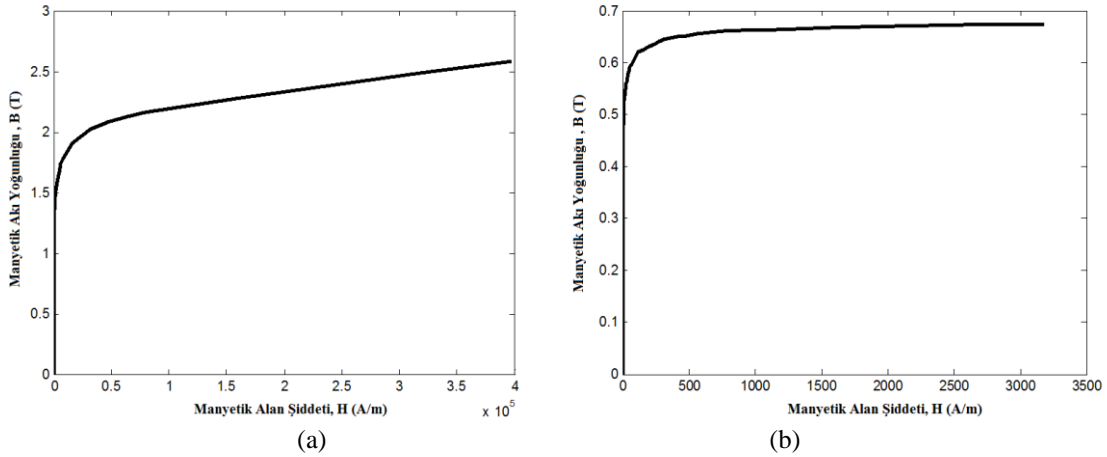
Şekil 5'ten görülebileceği üzere Tip 5 ÇARM'de stator bloğu, saç plakalarından meydana gelen halka şeklindeki iki stator bileşeninin yan yana getirilmesi ile oluşmakta ve dairesel olan stator sargısı da bu iki stator halkası arasına yerleştirilmektedir. Eksenel akı dağılımının sağlanabilmesi için ise bu iki stator halkasının arka demiri, tozlandırılmış demir malzemeden üretilmiş bir yapı ile sağlanmaktadır. Benzer yapı rotor bloğu için de geçerlidir. Gerçekte Tip 1A ÇARM'nin yapısını andıran bu motor yapısı diğer ÇARM'ler ile kıyaslandığında daha düşük üretim zorluğuna sahiptir.



Şekil 5. 12/12 yapıdaki Tip 5 ÇARM'nin tek fazına ait detaylı görünüm (Detailed appearance of one phase of the Type 5 12/12 TFSRM)

3. ÇALIŞMADA YER ALAN MAKİNELER VE BOYUTLARI İLE İLGİLİ HUSUSLAR (MACHINES FOR THE STUDY AND THEIR DIMENSIONAL CONSIDERATIONS)

Bu çalışmada yer alan makinaların boyutlandırılmasında Tip 5 ÇARM temel alınmıştır. Tip 5 ÇARM yapısının rotor ve stator blokları için tozlandırılmış demirden yapılan arka demire gereksinim duyması ve Şekil 6'dan da görülebileceği üzere bu amaçla kullanılan malzemenin (Mu-Metal) manyetik akı yoğunluğunun saç malzemenin (Steel 1008) akı yoğunluğu ile kıyaslandığında daha düşük değerlerde olması Tip 5 ÇARM'nin boyutlarını artırmaktadır.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan malzemelerin B-H karakteristiği (a) Steel 1008 (b) Mu-Metal (B-H characteristics of the used materials (a) Steel 1008 (b) Mu-Metal)

Tozlandırılmış demir malzemenin kullanıldığı stator ve rotor blokları ile ilgili bazı temel büyüklüklerin türetilmesi üzerinde durulursa, bir ARM'nin stator kutup alanı Eş. 1 ile verildiği gibidir.

$$A_s = l_s w_s \quad (1)$$

Burada l_s ve w_s , sırasıyla stator kutup uzunluğu ve stator kutbunun genişliğini ifade etmektedir. Aktif stator tozlandırılmış demir malzeme kutup alanı ise Eş. 2'de verildiği gibidir.

$$A_{spi} = l_{spi} w_{spi} \quad (2)$$

Eş. 2’de yer alan l_{spi} ve w_{spi} , sırasıyla tozlandırılmış demir malzemenin bir stator kutbu için aktif uzunluğunu (kalınlığını) ve genişliğini ifade etmektedir. Stator ve rotor kutuplarının üretildiği manyetik saç ve tozlandırılmış demir malzemenin eşit akı taşıdığı düşünüldüğünde,

$$\phi_s = \phi_{spi} \quad (3)$$

eşitliği yazılabilir. Eş. 3’te ϕ_s ve ϕ_{spi} , manyetik saç ve tozlandırılmış demir malzemenin manyetik akı değerini göstermektedir. Manyetik akı, manyetik akı yoğunluğu ve kesit alan olarak Eş. 4’te verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\phi = BA \quad (4)$$

Burada B manyetik akı yoğunluğu ve A ise etkin kesit alanıdır. Eş. 1 ve 4 kullanılarak statora ait tozlandırılmış demir malzemenin kalınlığı Eş. 5’teki gibi yazılabilir.

$$l_{spi} = \left(\frac{B_s}{B_{spi}} \right) \frac{l_s w_s}{w_{spi}} \quad (5)$$

Eş. 5’te B_s ve B_{spi} sırasıyla manyetik saç ve stator tozlandırılmış demir malzemenin diz noktalarındaki manyetik akı yoğunluğu değerleridir. Statora ait tozlandırılmış demir malzemenin bir stator kutbu için aktif genişliği ise

$$w_{spi} = k_s w_s \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eş. 6 ‘da k_s , stator tozlandırılmış demir malzemeye ait katsayı değeri olup değeri Eş.7’de verildiği gibidir.

$$k_s > 1 \quad (7)$$

Eş. 5 ve 6 kullanılarak statora ait tozlandırılmış demir malzemenin kalınlığı Eş. 8’de verildiği gibi düzenlenebilir.

$$l_{spi} = \left(\frac{B_s}{B_{spi}} \right) \frac{l_s}{k_s} \quad (8)$$

Sonuç olarak, statora ait tozlandırılmış demir malzemenin yarıçapı Eş. 9’da verildiği gibi elde edilmiş olur.

$$r_{spi} = r_{sout} + l_{spi} \quad (9)$$

Benzer şekilde rotora ait tozlandırılmış demir malzemenin kalınlığı Eş. 10’da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$l_{rpi} = \left(\frac{B_r}{B_{rpi}} \right) \frac{l_r}{k_r} \quad (10)$$

Eş. 10’da B_r ve B_{rpi} , sırasıyla rotora ait manyetik saç ve tozlandırılmış demir malzeme için diz noktalarındaki manyetik akı yoğunluğu değerlerini ifade etmektedir. l_r , rotor kutbunun aksenal boyu ve k_r ise rotor tozlandırılmış demir malzeme için katsayı değeridir. Rotora ait tozlandırılmış demir malzemenin yarıçapı ise Eş. 11’de verildiği gibi yazılabilir.

$$r_{rpi} = r_{shi} + l_{rpi} \quad (11)$$

Eş. 11’de r_{sh} , shaft yarıçapıdır.

Yapılan çalışmada, sözü edilen ÇARM’ler ile adil bir karşılaştırma yapılabilmesi adına Tip A ve Tip B olarak verilen iki farklı KARM yapısı dikkate alınmıştır. Tip A KARM, ÇARM’lerle aynı rotor dış çapına

sahipken, stator dış çapı ÇARM'lerden daha düşüktür. Tip B KARM ise Tip 5 ÇARM ile aynı stator dış çapına sahiptir. Ancak, Tip B KARM'nin rotor dış çapı Tip 5 ÇARM dikkate alınarak boyutlandırılmış olan ÇARM'lerin rotor dış çapından daha büyüktür. Çalışmada incelenen tüm makinalara ait bazı temel boyutlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Makina boyutları (Machine dimensions)

KARM Özellikleri	12/8 KARM		18/12 KARM		8/8 ÇARM	12/12 ÇARM	8/8 ÇARM Tipleri	12/12 ÇARM Tipleri
	Tip A	Tip B	Tip A	Tip B	Tip 5	Tip 5	1A-1B, 2A-2B, 3A-3B, 4A-4B	1A-1B, 2A-2B, 3A-3B, 4A-4B
Eksenel Uzunluk (mm)	165	165	165	165	165	165	165	165
Stator Dış Çapı (mm)	170	185	170	185	154	154	194	194
Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Dış Çapı (mm)					185	185		
Boyunduruk Kalınlığı (mm)	9	10	9	10	15,5	15,5	20	20
Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Dış Çapı (mm)					109,5	109,5		
Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Kalınlığı (mm)					40,25	40,25		
Rotor Dış Çapı (mm)	130	145	130	145	130	130	130	130
Hava Aralığı (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Rotor İç Çapı (mm)	111,5	126,5	111,5	126,5	111,5	111,5	111,5	111,5
Stator Kutup Sayısı	12	12	18	18	8	12	8	12
Rotor Kutup Sayısı	8	8	12	12	8	12	8	12
Stator Kutup Açısı (°)	15	15	10	10	15	10	15	10
Rotor Kutup Açısı (°)	16	16	10,75	10,75	16	10,75	16	10,75

Bu çalışmada KARM'lerin analizi için 2B-SEA kullanılmıştır. Tip A KARM için iki ve üç boyutlu SEA kullanılarak aynı şartlar altında elde edilen sonuçlar Tablo 2'de karşılaştırılmıştır. Tablo 2'ye bakıldığı zaman 2B-SEA ile elde edilen ortalama tork değerinin 3B-SEA ile elde edilenden yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte iki yöntem arasındaki maksimum fark % 3.31 olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla çalışmada KARM'lerin analizinde 2B-SEA'nın kullanılması uygun görülmüştür.

Tablo 2. Aynı şartlarda elde edilen 2B ve 3B SEA sonuçlarının karşılaştırılması (Comparing 2D and 3D FEA results obtained with the same conditions)

Özellikler	12/8 KARM Tip A		
	2B-SEA	3B-SEA	Yüzdeselel Fark
Ortalama Tork (Nm)	2,95	2,86	3,05
	18/12 KARM Tip A		
	5,14	4,97	3,31

4. ÖN ANALİZ (PRELIMINARY ANALYSIS)

Bu kısımda temel prensiplerden türetilmiş olan ve klasik ARM'ler ile çapraz akı dağılımına sahip ARM'ler arasındaki tork oranını veren ifadeler yer verilmiştir. Makineler için manyetik olarak doğrusal çalışma bölgesi dikkate alındığında elektromanyetik tork T_e , ko-enerji ile bağlantılı olarak Eş. 12'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$T_e = \frac{dW'}{d\theta} \quad (12)$$

Burada, θ rotor konumunu ifade etmektedir. Eş. 12'de yer alan ko-enerji W' ise halkalanma akısı λ ve akım i kullanılarak,

$$W' = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta)i \quad (14)$$

Eş. 14'te L , akım ve rotor konumunun bir fonksiyonu olarak indüktansı ifade etmektedir. Bu çalışmada ortalanan konumdaki indüktans ve etkileri daha kolay bir şekilde eşitliklerin elde edilebilmesi adına ihmal edilmiştir. Çakışık konumdaki indüktans L_a ifadesi, motor boyutları ve sarım sayısı ile Eş. 15'te verildiği gibidir.

$$L_a = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = \frac{P_s}{q} \left\{ \frac{N^2}{(l_g / A\mu_0)} \right\} \quad (15)$$

Burada P_s stator kutup sayısını, q faz sayısını, N kutup başına sarım sayısını, l_g stator ve rotor kutbu arasındaki hava aralığını, A etkin kesit alanını, μ_0 hava aralığındaki manyetik geçirgenliğini ve \mathfrak{R} ise manyetik akı yolundaki relüktans değerini göstermektedir. Eş. 12 ve 15 dikkate alındığında elektromanyetik tork değeri makine parametreleri cinsinden Eş. 16'da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$T_e = \left(\frac{\mu_0 P_s A}{2ql_g} \right) \frac{(N^2 i^2)}{d\theta} \quad (16)$$

Burada $d\theta$, Eş. 17'de verildiği üzere çakışık rotor konumu θ_a ve ortalanan rotor konumu θ_u arasındaki radyan cinsinden farkı ifade etmektedir.

$$d\theta = \theta_a - \theta_u = \frac{2\pi}{qP_r} \quad (17)$$

Burada P_r rotor kutup sayısını ifade etmektedir ve faz sayısı ile stator kutup sayısı cinsinden Eş. 18'de verildiği gibi yazılabilir.

$$P_r = \frac{q-1}{q} P_s \quad (18)$$

Eş. 16, 17 ve 18 dikkate alınarak tork, Eş. 19'da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$T_e = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{P_s P_r A}{l_g} \right) (Ni)^2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{q-1} \left(\frac{A}{l_g} \right) (P_r Ni)^2 \quad (19)$$

Eş. 19, KARM'ye ait elektromanyetik tork T_{ec} ve ÇARM'ye ait elektromanyetik tork T_{et} oranının elde edilmesi için kullanıldığında;

$$\frac{T_{ec}}{T_{et}} = \frac{A_c P_{rc}^2 N_c^2}{A_t P_{rt}^2 N_t^2} \quad (20)$$

Eş. 20 ifadesi elde edilir. Burada semboller ile birlikte kullanılan c ve t alt indisleri bu sembollerin sırasıyla klasik ve çapraz akı dağılımına sahip makinaya ait olduğunu göstermektedir. Burada eşit nitelikteki güç sistemleri ve hava aralığına bağlı üretim sıkıntıları açısından eşdeğer durumların değerlendirilebilmesi adına tüm ARM'ler için akım ve hava aralığının aynı olduğu varsayılmıştır.

ÇARM'lerin çakışık konumdaki indüktansı Eş. 21 kullanılarak hesaplanabilir.

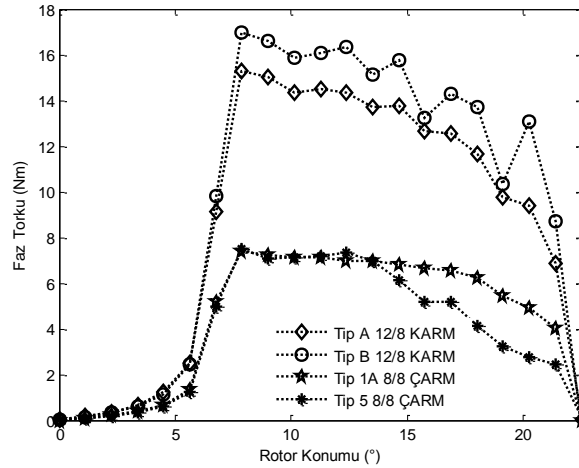
$$L_a = \frac{P_s NBA}{i} \quad (21)$$

Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri dikkate alınıp tasarımlar gerçekleştirildiğinde 8/8 Tip 5 ÇARM ve 12/8 Tip A KARM ile 12/12 Tip 5 ÇARM ile 18/12 Tip A KARM motor yapıları için Eş. 20, 22 ve 23'ün kullanılması ile yapılan hesaplamalarda klasik yapıdaki ARM'lerin çapraz akı dağılımına sahip ARM'lere göre iki kat daha fazla tork üretebilme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, ilgili kriterler altında KARM'lerin ÇARM'lere kıyasla 8 kat daha fazla etkin kutup alanına sahip olmasıdır.

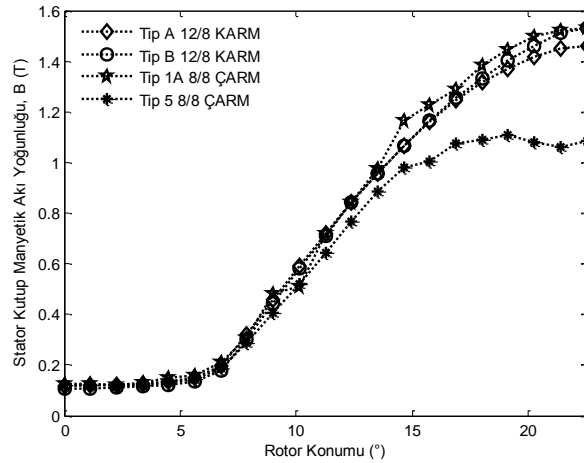
$$\frac{T_{ec}}{T_{et}} = \frac{A_c P_{rc}^2 N_c^2}{A_t P_{rt}^2 N_t^2} \cong \frac{A_c P_{rt}^2 72^2}{1/8 A_c P_{rt}^2 144^2} \cong 2 \quad (22)$$

$$\frac{T_{ec}}{T_{et}} = \frac{A_c P_{rc}^2 N_c^2}{A_t P_{rt}^2 N_t^2} \cong \frac{A_c P_{rt}^2 50^2}{1/8 A_c P_{rt}^2 100^2} \cong 2 \quad (23)$$

Aynı sonuçlar 8/8 Tip 1A ÇARM ve 12/8 Tip B KARM ile 12/12 Tip 1A ÇARM ve 18/12 Tip B KARM için de geçerlidir. Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri dikkate alınarak yapılan tasarımlar için SEA sonunda elde edilen tork ve stator kutbu ortalama manyetik akı yoğunluğu karakteristikleri sırasıyla Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. Şekil 7 ve 8'den görülebileceği üzere motorlara ait stator kutbuna ait akı yoğunluğu profilleri benzer olmasına karşın KARM'lerin ürettiği tork değerleri, ÇARM'lerin ürettiği tork değerlerine kıyasla çok daha yüksek olup arada yaklaşık olarak iki katlık bir fark vardır. 18/12 KARM'ler ile 12/12 ÇARM'ler için elde edilen sonuçlar da benzer olduğu için ilgili motorlara ait sonuçlar sadelik sağlanabilmesi için adına çalışmada verilmemiştir.



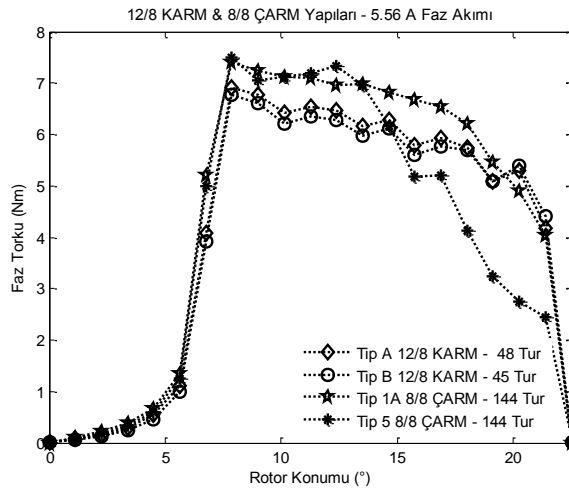
Şekil 7. Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerine göre tasarımı yapılan farklı yapıdaki 12/8 KARM ve 8/8 ÇARM'ler için rotor konumuna karşılık faz torku (Phase torque versus rotor position for various 12/8 CSRMs and 8/8 TSRMs designed to obtain maximum flux density)



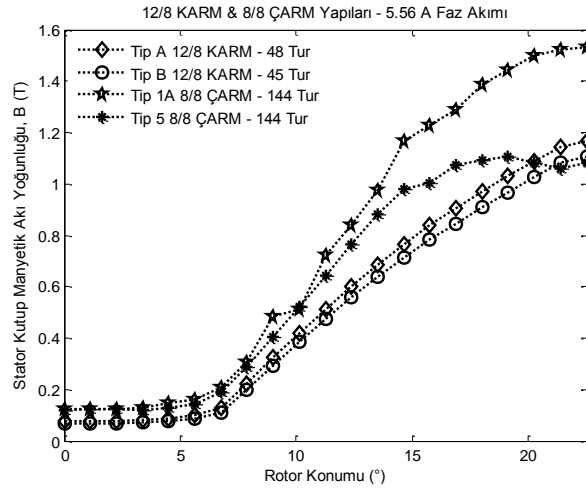
Şekil 8. Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerine göre tasarımı yapılan farklı yapıdaki 12/8 KARM ve 8/8 ÇARM'ler için rotor konumuna karşılık stator kutbu akı yoğunluğu (Stator pole flux density versus rotor position for various 12/8 CSRMs and 8/8 TSRMs designed to obtain maximum flux density)

8/8 ÇARM yapıları için maksimum sarım sayısı stator yarık hacmi tarafından sınırlanır ve kutup başına 144'tür. Aynı zamanda 18/12 KARM de aynı sayıda sarım yapılabilmesi için 12/8 KARM'nin sahip olduğu yarık hacmine sahip değildir. Benzer şekilde 12/12 ÇARM de 8/8 ÇARM ile kıyaslandığında daha az sarım sayısına sahiptir.

8/8 ÇARM ve 12/8 KARM'ye ait faz akımları ya da 12/12 ÇARM ve 18/12 KARM'ye ait faz akımlarının eşit olduğu düşünüldüğünde aynı tork değeri için motorların sarım sayısının ne olması gerektiği analitik olarak ya da SEA kullanılarak hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalarda Tip A ve Tip B 12/8 KARM için sarım sayıları kutup başına sırasıyla 48 ve 45 olarak elde edilirken Tip A ve Tip B 18/12 KARM için sarım sayıları kutup başına sırasıyla 33 ve 31 şeklindedir. Hesaplanan bu değerlere göre tork ve stator kutbu akı yoğunluğu profilleri sırasıyla Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere ÇARM'lerin manyetik akı yoğunluğu profilleri ilgili MMK için doyum bölgesi civarındadır ve benzer tork profillerine sahip KARM'ler ile kıyaslandığında daha yüksek akı yoğunluğu değerleri görülmektedir.



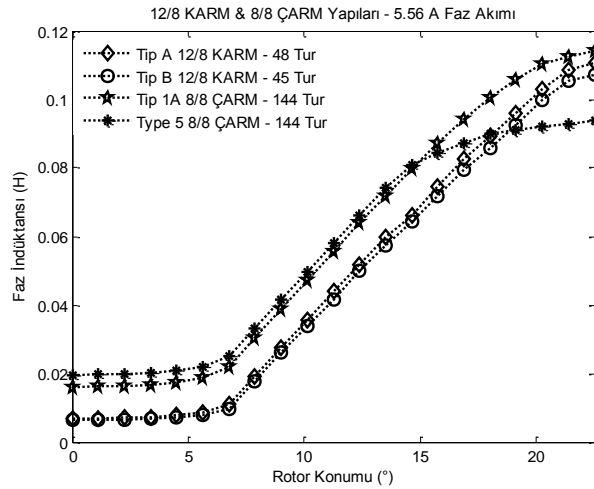
Şekil 9. Benzer tork profiline sahip farklı 12/8 KARM ve 8/8 ÇARM'ler için rotor konumuna karşılık faz torku (Phase Torque versus rotor position for various 12/8 CSRMs and 8/8 TSRMs with similar torque profiles)



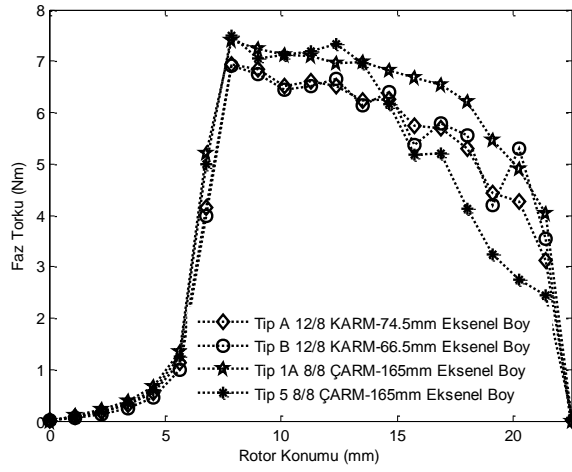
Şekil 10. Benzer tork profiline sahip farklı 12/8 KARM ve 8/8 ÇARM'ler için rotor konumuna karşılık stator kutbu akı yoğunluğu (Stator pole flux density versus rotor position for various 12/8 CSRMs and 8/8 TSRMs with similar torque profiles)

Şekil 11'de verilen indüktans karakteristiklerine bakıldığında KARM ve ÇARM yapılarının birbirlerine benzer karakteristiklere sahip olduğu ve ilgili akım değeri için indüktanslarının rotor konumuna göre değişiminin neredeyse eşit olduğu görülmektedir. Dolayısıyla KARM'lerin sahip olduğu indüktans profiline bakıldığı zaman ÇARM'lerin sahip olduğu indüktans değişimi oranının sağlanabilmesi için KARM'lerde daha az sarım sayısının yeterli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte motorların ürettiği tork değerleri ve indüktans değişiminin benzer olarak elde edilebilmesi için KARM'lerin aksel boylarının azaltılabilmesi de mümkündür. Bu durum tork ve indüktans karakteristikleri için sırasıyla Şekil 12 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.

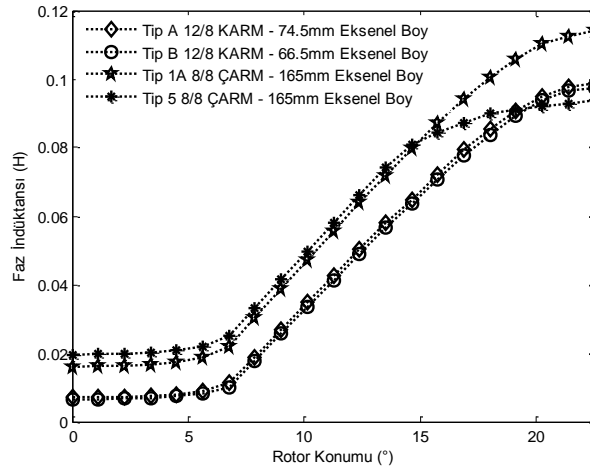
Tüm 8/8 ve 12/12 ÇARM yapılarına ait tork yoğunluğu değerleri ile bazı farklılıklar sırasıyla Tablo 3 ve 4'te gösterilmiştir. İlgili tablolar incelendiği zaman tork üretebilme kabiliyeti açısından en uygun yapıların Tip 1A ve Tip 1B ÇARM yapıları olduğu görülmektedir. Buna karşın gerçekleştirilebilir uygunluğu açısından en uygun yapı olan Tip 5 ÇARM'nin diğer tüm ÇARM'lerden yaklaşık iki kata varan daha yüksek birim sarğı başına tork üretebilme avantajına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Benzer faz indüktansı profiline sahip farklı 12/8 KARM ve 8/8 ÇARM'ler için rotor konumuna karşılık faz indüktansı (Phase Inductance versus rotor position for various 12/8 CSRMs and 8/8 TSRMs with similar inductance profiles)



(a)



(b)

Şekil 12. Farklı eksesel boylar için (a) faz torku, (b) faz indüktansı profilleri ((a) Phase Torque and (b) inductance versus rotor position for different stack lengths)

Tablo 3. Tüm 8/8 ÇARM çeşitleri arasındaki farklılıklar (Differences between all types of 8/8 TSRMs)

Motor Çeşidi Özellikler	8/8 ÇARM								
	Tip 1A	Tip 1B	Tip 2A	Tip 2B	Tip 3A	Tip 3B	Tip 4A	Tip 4B	Tip 5
Ortalama Tork (Nm)	5,78	6,01	5,76	5,89	5,64	5,88	5,50	5,80	5,11
Faz Akımı (A)	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56
Kutup Başına Sarım Sayısı (Tur)	144	144	144	144	144	144	288	288	144
Aktif Stator Saç Hacmi (m ³)	6,44e-4	6,44e-4	6,44e-4	6,44e-4	5,83e-4	5,83e-4	5,83e-4	5,83e-4	2,53e-4
Aktif Rotor Saç Hacmi (m ³)	6,56e-4	4,86e-4	6,56e-4	4,86e-4	5,90e-4	2,48e-4	5,90e-4	2,48e-4	1,87e-4
Sargı (Bakır) Hacmi (m ³)	1,93e-4	1,93e-4	3,27e-4	3,27e-4	2,94e-4	2,94e-4	4,13e-4	4,13e-4	1,93e-4
Aktif Stator Saç Ağırlığı (kg)	5,76	5,76	5,76	5,76	5,22	5,22	5,22	5,22	2,27
Aktif Rotor Saç Ağırlığı (kg)	5,87	4,35	5,87	4,35	5,28	2,22	5,28	2,22	1,68
Sargı (Bakır) Ağırlığı (kg)	1,73	1,73	2,93	2,93	2,63	2,63	3,7	3,7	1,73
Aktif Motor Ağırlığı (kg)	13,36	11,84	14,56	13,04	13,13	10,07	14,20	11,14	31,20
Birim Sargı Hacmi Başına Tork (Nm/m ³)	29948	31140	17615	18012	19184	20000	13317	14044	26477
Birim Sargı Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	3,34	3,47	1,97	2,01	2,14	2,24	1,49	1,57	2,95
Aktif Motor Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	0,43	0,51	0,40	0,45	0,43	0,58	0,39	0,52	0,16

Tablo 4. Tüm 12/12 ÇARM çeşitleri arasındaki farklılıklar (Differences between all types of 12/12 TSRMs)

Motor Çeşidi Özellikler	12/12 ÇARM								
	Tip 1A	Tip 1B	Tip 2A	Tip 2B	Tip 3A	Tip 3B	Tip 4A	Tip 4B	Tip 5
Ortalama Tork (Nm)	9,15	9,44	9,00	9,17	8,94	9,28	8,87	9,24	8,84
Faz Akımı (A)	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56
Kutup Başına Sarım Sayısı (Tur)	144	144	144	144	144	144	288	288	144
Aktif Stator Saç Hacmi (m ³)	6,44e-4	6,44e-4	6,44e-4	6,44e-4	5,83e-4	5,83e-4	5,83e-4	5,83e-4	2,53e-4
Aktif Rotor Saç Hacmi (m ³)	6,56e-4	4,86e-4	6,56e-4	4,86e-4	5,90e-4	2,48e-4	5,90e-4	2,48e-4	1,87e-4
Sargı (Bakır) Hacmi (m ³)	1,93e-4	1,93e-4	3,27e-4	3,27e-4	2,94e-4	2,94e-4	4,13e-4	4,13e-4	1,93e-4
Aktif Stator Saç Ağırlığı (kg)	5,76	5,76	5,76	5,76	5,22	5,22	5,22	5,22	2,27
Aktif Rotor Saç Ağırlığı (kg)	5,87	4,35	5,87	4,35	5,28	2,22	5,28	2,22	1,68
Sargı (Bakır) Ağırlığı (kg)	1,73	1,73	3,84	3,84	3,66	3,66	3,7	3,7	1,73
Aktif Motor Ağırlığı (kg)	13,36	11,84	15,47	13,95	14,16	11,10	14,20	11,14	31,20
Birim Sargı Hacmi Başına Tork (Nm/m ³)	47409	48912	27523	28043	30408	31565	21477	22373	45803
Birim Sargı Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	5,29	5,46	2,34	2,39	2,44	2,54	2,40	2,50	5,11
Aktif Motor Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	0,68	0,80	0,58	0,66	0,63	0,84	0,62	0,83	0,28

Tablo 5'te benzer tork karakteristiğine ve aynı eksenel boya sahip olan 12/8 KARM çeşitleri ile 8/8 Tip 1A ve Tip 5 ÇARM yapıları arasındaki yapısal farklılıklar verilmiştir. Aynı farklılıklar 18/12 KARM çeşitleri ile 12/12 Tip 1A ve Tip 5 ÇARM yapıları için ise Tablo 6'da sunulmuştur. Tablo 5 ve 6 incelendiğinde Tip 1A ÇARM yapısının Tip A KARM ile kıyaslandığı zaman motor ağırlığı dikkate alındığında % 30 daha yüksek tork yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte endüstriyel uygulamalar açısından endüstriyel cihazların hacimleri çok daha önem arz ettiğinden motor hacmi temel alınarak bir karşılaştırma yapıldığında Tip A KARM, Tip 1A ÇARM ile kıyaslanacak olursa yaklaşık olarak % 25 daha yüksek tork yoğunluğuna sahiptir. Dolayısıyla bu açıdan değerlendirildiğinde tüm motor yapıları içerisinde Tip A KARM yapılarının avantajlı olduğu söylenebilir.

Tablo 5. 5.56A faz akımı için 12/8 KARM ile 8/8 ÇARM yapıları arasında karşılaştırma (Comparison between 12/8 CSRMs and 8/8 TSRMs for 5.56A phase current)

Motor Çeşidi Özellikler	12/8 KARM		8/8 ÇARM	
	Tip A	Tip B	Tip 1A	Tip 5
Faz Akımı (A)	5,56	5,56	5,56	5,56
Faz Başına Sarım Sayısı (Tur)	192	180	144	144
Stator Hacmi (m ³)	1,12e-3	1,28e-3	6,44e-4	2,53e-4
Rotor Hacmi (m ³)	1,72e-3	2,21e-3	6,56e-4	1,87e-4
Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Hacmi (m ³)				1,38e-3
Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Hacmi (m ³)				1,47e-3
Stator Tutucu Hacmi (m ³)			1,65e-3	
Rotor Tutucu Hacmi (m ³)			0,93e-3	
Stator Ağırlığı(kg)	10,02	11,46	5,76	2,27
Rotor Ağırlığı(kg)	15,39	19,78	5,87	1,68
Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Ağırlığı (kg)				12,38
Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Ağırlığı (kg)				13,14
Stator Tutucu Ağırlığı(kg)			4,45	
Rotor Tutucu Ağırlığı(kg)			2,51	
Sargı Ağırlığı (kg)	2,05	2,02	1,73	1,73
Motor Hacmi (m ³)	3,07e-3	3,71e-3	4,07e-3	3,48e-3
Motor Ağırlığı (kg)	27,46	33,26	20,32	31,2
Aktif Motor Hacmi (m ³)	3,07e-3	3,71e-3	1,49e-3	3,48e-3
Aktif Motor Ağırlığı (kg)	27,46	33,26	13,36	31,2
Ortalama Tork (Nm)	5,27	5,15	5,78	5,11
Birim Motor Hacmi Başına Tork (Nm/m ³)	1717	1388	1420	1468
Birim Motor Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	0,192	0,155	0,284	0,164
Aktif Motor Hacmi Başına Tork (Nm/m ³)	1717	1388	3879	1468
Aktif Motor Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	0,192	0,155	0,433	0,164

Tablo 6. 8A faz akımı için 18/12 KARM ile 12/12 ÇARM yapıları arasında karşılaştırma (Comparison between 18/12 CSRMs and 12/12 TSRMs for 8A phase current)

Motor Çeşidi Özellikler	18/12 KARM		12/12 ÇARM	
	Tip A	Tip B	Tip 1A	Tip 5
Faz Akımı (A)	8	8	8	8
Faz Başına Sarım Sayısı (Tur)	198	186	100	100
Stator Hacmi (m ³)	1,12e-3	1,28e-3	6,44e-4	2,53e-4
Rotor Hacmi (m ³)	1,72e-3	2,21e-3	6,56e-4	1,87e-4
Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Hacmi (m ³)				1,38e-3
Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Hacmi (m ³)				1,47e-3
Stator Tutucu Hacmi (m ³)			1,65e-3	
Rotor Tutucu Hacmi (m ³)			0,93e-3	
Stator Ağırlığı(kg)	10,02	11,46	5,76	2,27
Rotor Ağırlığı(kg)	15,39	19,78	5,87	1,68
Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Ağırlığı (kg)				12,38
Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Ağırlığı (kg)				13,14
Stator Tutucu Ağırlığı(kg)			4,45	
Rotor Tutucu Ağırlığı(kg)			2,51	
Sargı Ağırlığı (kg)	2,03	1,94	1,19	1,19
Motor Hacmi (m ³)	3,07e-3	3,71e-3	4,01e-3	3,41e-3
Motor Ağırlığı (kg)	27,44	33,18	19,78	30,66
Aktif Motor Hacmi (m ³)	3,07e-3	3,71e-3	1,43e-3	3,41e-3
Aktif Motor Ağırlığı (kg)	27,44	33,18	12,82	30,66
Ortalama Tork (Nm)	9,00	8,87	9,15	8,84
Birim Motor Hacmi Başına Tork (Nm/m ³)	2932	2391	2282	2592
Birim Motor Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	0,328	0,267	0,463	0,288
Aktif Motor Hacmi Başına Tork (Nm/m ³)	2932	2391	6399	2592
Aktif Motor Ağırlığı Başına Tork (Nm/kg)	0,328	0,267	0,714	0,288

5. FİZİKSEL YAPILANDIRMA ZORLUKLARI (PHYSICAL ASSEMBLY DIFFICULTIES)

Tip 5 ÇARM'nin üretiminde saç plakalarının yerleşimi klasik yapıdaki ARM'lerinkine oldukça benzer olduğu için Tip 5 ÇARM, diğer tüm ÇARM yapıları içerisinde en kolay üretilebilme avantajına sahiptir. Dolayısıyla Tip 5 ÇARM yapısının, KARM yapısı ile bazı ortak mekaniksel özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Bununla birlikte akının aksel olarak dolaşabilmesi için stator ve rotor tozlandırılmış demir malzemelerin kullanılma zorunluluğu bu yapının KARM'lerle en büyük farklılığıdır. Aynı zamanda, Tip 5 ÇARM'de iki farklı manyetik özelliğe sahip motor yapısı birlikte kullanıldığından, bu yapıların olası ek relüktansların ve kaçak akıların açığa çıkmasının önüne geçilebilmesi adına çok iyi bir şekilde yerleştirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Diğer ÇARM yapıları için ise çok sayıda rotor ve stator parçasının bir arada ve uygun şekilde tutulabilmesi için özel mekaniksel aksamlara gereksinim duyulmaktadır. Bu durum, artan üretim maliyeti dışında birçok üretim süreci ve zorluğunu da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla ancak sınırlı bir güç aralığında (< 25hp) bu tip motorların gerçekleştirimi mümkün iken daha yüksek güçlerde KARM'lere kıyasla çok daha fazla üretim sorunlarıyla karşılaşılması olasıdır.

Sonuç olarak tüm ÇARM'ler için KARM'ler ile kıyaslandığında daha fazla mekaniksel aksamlara ve üretim süreçlerine gereksinim duyulmakta olup bu durum da ek üretim maliyetlerini beraberinde getirmektedir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, radyal akı dağılımına sahip klasik ARM'ler ile farklı yapıdaki çapraz akı dağılımına sahip ARM'ler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Çok sayıda ARM yapısı, analitik ve nümerik metotların kullanılması suretiyle analiz edilmiştir. Yapılan analiz çalışmalarında literatürde yer alan neredeyse tüm ÇARM yapıları dikkate alınmış ve bu yapıların gerek KARM yapıları ile gerekse de kendi aralarında karşılaştırılabilmesine olanak sağlanmıştır. Gerek motor boyutları gerekse de maksimum akı yoğunluğu ve ortalama tork değerleri temel alınarak yapılan çalışmalarda genel olarak KARM yapılarının birçok açıdan daha avantajlı oldukları elde edilen sonuçlarda gösterilmiştir. Analizler sonunda elde edilen sonuçlar ve mekaniksel hususlar dikkate alındığında klasik radyal akı dağılımına sahip ARM'lerin çapraz akı dağılımına sahip ARM'ler ile karşılaştırıldığında daha tercih edilebilir seçenekler olduğu görülmektedir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

A_s	Stator Kutup Kesit Alanı
l_s	Stator Kutup Uzunluğu
w_s	Stator Kutup Genişliği
A_{spi}	Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Etkin Kesit Alan
l_{spi}	Stator Kutbu için Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Kalınlığı
w_{spi}	Stator Kutbu için Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Genişliği
ϕ_s	Stator Saç Plakası Manyetik Akısı
ϕ_{spi}	Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Manyetik Akısı
ϕ	Manyetik Akı
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
A	Etkin Kesit Alan
B_s	Stator Saç Plaka Manyetik Akı Yoğunluğu
B_{spi}	Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Manyetik Akı Yoğunluğu
k_s	Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Sabiti
r_{spi}	Statora Ait Tozlandırılmış Demir Malzemenin Yarıçapı
B_r	Rotor Saç Plaka Manyetik Akı Yoğunluğu
B_{rpi}	Stator Tozlandırılmış Demir Malzeme Manyetik Akı Yoğunluğu
l_r	Rotor Kutbunun Eksenel Boyu
k_r	Rotor Tozlandırılmış Demir Malzeme Sabiti
r_{sh}	Şaft Yarıçapı
r_{rpi}	Rotora Ait Tozlandırılmış Demir Malzemenin Yarıçapı
T_e	Elektromanyetik Tork
W'	Ko-enerji
λ	Halkalanma Akısı
i	Akım
L_a	Çakışık Konumdaki İndüktans

P_s	Stator Kutup Sayısı
q	Faz Sayısı
N	Kutup Başına Sarım Sayısı
l_g	Hava Aralığı
μ_0	Hava Aralığı Manyetik Geçirgenliği
\mathfrak{R}	Relüktans
θ_a	Radyan Cinsinden Çakışık Rotor Konumu
θ_u	Radyan Cinsinden Ortalanmış Rotor Konumu
P_r	Rotor Kutup Sayısı
T_{ec}	KARM' ye ait Elektromanyetik Tork
T_{et}	ÇARM' ye ait Elektromanyetik Tork

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

N. Üstkoyuncu, Virginia Tech'de doktora sonrası çalışmalarda bulunmak üzere kendisine finansal destek sağlayan KCETAŞ'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Krishnan R., Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, CRC Press, New York, A.B.D, 2001.
- [2] Krishnan R., An energy-efficiency-enhanced switched reluctance motor [from mind to market], IEEE Industrial Electronics Magazine, 1 (1), 4-6, 2007.
- [3] Oh S.G., Krishnan R., Two-phase SRM with flux-reversal-free stator: concept, analysis, design and experimental verification, IEEE Transactions on Industry Applications, 43 (5), 1247-1257, 2007.
- [4] Daldaban F., Ustkoyuncu N., Multi-layer switched reluctance motor to reduce torque ripple, Energy Conversion and Management, 49 (5), 974-979, 2008.
- [5] Lee C., Krishnan R., Lobo N.S., Novel two-phase switched reluctance machine using common-pole E-core structure: concept, analysis and experimental verification, IEEE Transactions on Industry Applications, 45 (2), 703-711, 2009.
- [6] Lee C., Krishnan R., New designs of a two-phase E-core switched reluctance machine by optimizing the magnetic structure for a specific application: concept, design, and analysis, IEEE Transactions on Industry Applications, 45 (5), 1804-1814, 2009.
- [7] Kim J., Ha K., Krishnan R., Single-controllable-switch-based switched reluctance motor drive for low cost variable-speed applications, IEEE Transactions on Power Electronics, 27 (1), 379-387, 2012.
- [8] Vattikuti N., Vandana R., Fernandes B.G., A novel high force density linear segmented switched reluctance machine, 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics – IECON, 1083-1088, 10-13 November 2008.
- [9] Sui-chun Q., Hua-bo L., Xiao-guang M., A design of transverse flux switched reluctance motors with permanent magnet shield, International Conference on Electrical Machines and Systems – ICEMS, 3367-3369, 17-20 October 2008.
- [10] Baoming G., De Almeida A.T., Ferreira F., Design of transverse flux linear switched reluctance motor, IEEE Transactions on Magnetics, 45 (1), 113-119, 2009.

- [11] Zula A., Mecrow B.C., Armstrong M., A wound-field three-phase flux-switching synchronous motor with all excitation sources on stator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46 (6), 2363-2371, 2010.
- [12] Song U., You Y., Kwon B., Design and analysis of transverse flux switched reluctance generators for wind turbine, 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Fields Computation – CEFC, 9-12 May 2010.
- [13] Darabi S., Beromi Y.A., Izadfar H.R., Comparison of two common configurations of LSRM: Transverse flux and longitudinal flux, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE*, 451-455, 25-27 October 2012.
- [14] Li Y., Li H., Li Z., Design and implement of novel transverse flux switched reluctance magnetic energy motor combined with control system, *International Conference on Mechatronics and Automation – ICMA*, 1675-1680, 4-7 August 2013.
- [15] Gundogan Turker C., Çınar M.A., Erfan Kuyumcu F., Analysis of the E-core transverse flux machine for indoor training bike application, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (1), 61-69, 2014.
- [16] Amreiz H.M., Mecrow B.C., Weiner C., Linde A.G., Switched reluctance machines with simple hoop windings, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 522-526, 4-7 June 2002.
- [17] Hongquan Y., Chenglin G., Analytical design and modeling of transverse flux switched reluctance machine, *International Conference on Electrical Machines and Systems – ICEMS*, 3414-3416, 17-20 October 2008.
- [18] Amreiz H.M., A comparison between transverse flux and conventional switched reluctance machine, 19th *International Conference on Electrical Machines – ICEM*, 1-8, 6-8 September 2010.
- [19] Vannier J.C., Vidal P., Poirson C., Analysis and control of a reluctance motor having a toroidal magnetic circuit, *International Conference on Electrical Machines – ICEM*, 119-124, 2-4 September 1998.
- [20] Amreiz H.M., Difficulties and complexities encountered in the design of transverse flux machines, *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion – ESARS*, 1-6, 16-18 October 2012.
- [21] Ustkoyuncu N., Krishnan R., A performance comparison of conventional and transverse flux linear switched reluctance motors, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23 (4), 974-986, 2015.



Rüzgâr ve Deniz Akıntı Enerjisinin Tahrik Ettiği Güç Üretim Sisteminin İncelenmesi

Ahmet AKTAŞ^{1,*}, Yağmur KIRÇIÇEK², Arif Şenol ŞENER³

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43500, Simav/KÜTAHYA

²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 78050, Merkez/KARABÜK

³Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 00000, 34398 Sarıyer/İSTANBUL

Öz

Rüzgâr ve deniz yüksek enerji potansiyeline sahip yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Deniz/okyanuslar rüzgâr, dalga, gelgit, akış gibi birden fazla enerji türüne sahiptir. Bu çalışmanın amacı birden çok enerji kaynağını elektrığe dönüştürecek bir sistem tasarlamaktır. Rüzgâr ve deniz akıntı enerjisinden yararlanan, yüksek potansiyelli hibrit güç üretim sistemi modeline sahip bir platform oluşturulmuştur. Fakat bu yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış karakteristiği doğa koşullarına bağlı olduğundan kesintili ve kararsız enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu kaynakların kararsız çıkış gücünü düzenlemek için hibrit enerji depolama birimi eklenmiştir. Hibrit güç üretim sistemine, batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit bir enerji depolama ünitesi eklenerek yük tarafına kaliteli ve sürekli enerji ihtiyacı sağlanmaktadır. Ayrıca hibrit enerji depolama biriminde bulunan ultrakapasitör grubunun ani yük durumlarında sistemde bulunan bataryaya destek olarak derin deşarj olmasını ve gerilim çökmesini engellediği simülasyon çalışmalarıyla gösterilmektedir. Bu çalışmada hibrit enerji üretim sistemi ve hibrit enerji depolama sistemi MATLAB/Simulink programı kullanılarak tüm birimleri simüle edilmektedir. Sisteme özgün yazılan akıllı enerji yönetim algoritması, DA/DA dönüştürücünün ve evirici devrelerinin kontrolünü sağlayarak, tüm güç parametrelerini sürekli hesaplamaktadır. Bu makalede, talep edilen yükün hibrit güç üretim sistemi tarafından üretilen enerjiden yüksek olduğu çalışma durumu incelenerek akım, gerilim ve güç grafik sonuçları detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda ultrakapasitörün ani yük durumunda bataryanın derin deşarj olmasını önleyecek sürede devreye girdiği tespit edilmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 08/08/2018

Düzeltilme: 03/12/2018

Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Batarya

Deniz akıntı enerjisi

Hibrit enerji depolama

Rüzgâr enerjisi

Ultrakapasitör

Keywords

Battery

Sea flow energy

Hybrid energy storage

Wind energy

Ultracapacitor

Investigation of Power Generation System Driven by Wind and Sea Flow Energy

Abstract

Wind and sea are renewable sources of energy with high energy potential. The sea/oceans have more than one type of energy such as wind, wave, tide, flow. The purpose of this work is to design a system that will convert multiple sources of energy into electricity. A platform with a high-potential hybrid power generation system model that utilizes wind and sea flow energy has been established. However, since the output characteristic of renewable energy sources depends on the natural conditions, it produces intermittent and unstable energy production. Hybrid energy storage units have been added to regulate the unstable output of these sources. A hybrid energy storage unit consisting of a battery and an ultracapacitor is added to the hybrid power generation system to provide a high quality and continuous energy requirement on the load. In addition, the ultracapacitor group in the hybrid energy storage unit is indicated by simulation studies that prevent the deep discharge and the voltage collapse by supporting the battery in the system under sudden load situations. In this study, all units are simulated using hybrid energy production system and hybrid energy storage system MATLAB/Simulink program. The smart energy management algorithm, which is originally written to the system, continuously calculates all the power parameters by controlling the DC/DC converter and inverter circuits. In this paper, the case where the demand load energy is higher than the energy produced by the hybrid power generation system is examined and current, voltage and power graphical results are given in detail. As a result of this investigation, it has been found that the ultracapacitor is switched on in the event of a sudden load, preventing the battery from being deep discharged.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada çeşitli ülkeler büyük güçlü yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemleri üzerine birçok çalışmalar ve hedefler gerçekleştirmektedir. Güneş, rüzgâr ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulum ve yatırım maliyetinin yanında bir diğer dezavantajı da ürettikleri enerjinin kesintili, değişken ve kararsız olmasıdır. Burada kesintili olma aralığı saniyeler dakikalar bazında olmakla birlikte mevsimsel değişimlere bağlı olarak da daha uzun süreli olabilmektedir. Bu kararsız davranışlar şebeke bazında gerilim dalgalanması, gerilim çökmesi, frekans değişikliği gibi bazı önemli sorunları ortaya çıkarabilmektedir. Bu etkiyi ortadan kaldırmak adına coğrafi olarak farklı bölgelere yenilenebilir enerji kaynak sistem kurulumları gerçekleştirilmiştir [1,2]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) bu kararsız ve kesintili çıkış karakteristiğini düzeltmenin en uygun yolu enerji depolama sistemlerinin kullanılmasıdır. Geliştirilen değişik algoritmalar ile güç akışını kontrol ederek sistemler arasında enerjinin aktarılması sağlanabilmektedir. Depolama birimleri YEK'lerin bu olumsuz etkilerini ortadan kaldırarak etkin kullanımını sağlamıştır. YEK'te ki bu talepler günümüz teknolojisinde enerji depolama birimlerinin verim ve performanslarını arttırarak, literatür ve uygulama alanlarında ilgi çekici bir konu haline getirmiştir [2].

Yüzen platform uygulamaları için değişik eksenli rüzgâr türbinleri vardır ve bunlardan dikey eksenli olanları kanat tasarım çalışmaları son zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Cranfield Üniversitesi ve Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde geliştirilen Darrieus tipi rüzgâr türbini ile 5MW nominal kapasiteli bir konsept oluşturulmuştur. Tasarlanan türbininin dinamik davranışları incelenerek performans ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır [3]. Ayrıca deniz/okyanus ortamında bulunan dikey eksenli rüzgâr türbinlerin ağır çalışma şartları (dalgalanma, sallanma, yalpalama) için özel tasarım kriterlerinin geliştirilmesi ihtiyacı duyulmaktadır [4,5]. Çeşitli çevresel koşullar simüle edilerek aerodinamik ve hidrodinamik yüklerin platformun hareketi üzerindeki etkileşimini gösteren yuvarlak ve yarı dalgıç hareket tepkilerine genel bir bakış sunulmaktadır [5]. Bu yapılan çalışmalar sonucunda, yüzen destek yapıları dikey eksenli rüzgâr türbinlerini yeterince destekleyebiliyor olsa da, bağlama sistemlerinin, özellikle dalgalı hava koşullarında dikey eksenli rüzgâr türbinleri aşırı çekme gerilimi ve sallanmaya maruz kaldığından bunları engellemek için bu yapıların yeniden tasarlanması gerektiğini göstermektedir [6, 7].

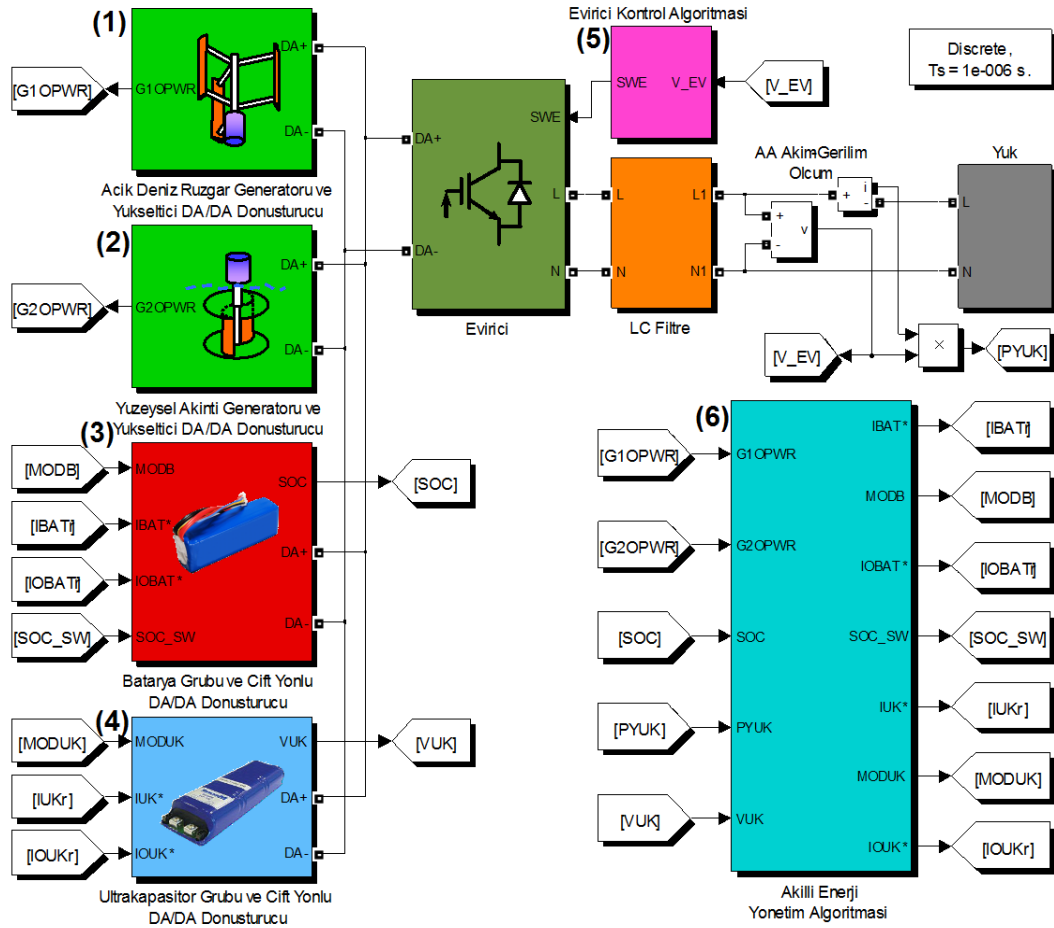
YEK'ni birlikte kullanarak hibrit güç üretim sistemleri (HGÜS) oluşturulmaktadır. Böylece farklı zaman dilimlerinde güç üretimi sağlanarak üretimin sürekliliği sağlanmaktadır. Hibrit enerji depolama sisteminin (HEDS) amacı, farklı karakteristiklere sahip enerji depolama sistem teknolojilerinin güç ve enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, tepki süresi gibi özellikleri bir araya getirerek tamamlayıcı niteliklere sahip bir sistem oluşturmaktır [8-10]. Başka bir deyişle, yüksek güçlü enerji depolama birimleri hızlı tepki oranına sahiptir, aksine yüksek enerjili enerji depolama birimleri yavaş tepki oranına sahiptir. Bu nedenle, farklı enerji depolama sistem teknolojilerinin işlevsel avantajlarını bir araya getirerek sinerjik şekilde hibritize etmek yararlı olmuştur. Bu yeni teknoloji, özellikle yenilenebilir enerji ve elektrikli nakliye sektörü alanlarında birçok araştırmacı tarafından araştırmalar devam etmektedir. Elektrikli taşıma sektöründe, bataryalı araçların ultrakapasitörle hibrit enerji depolama birimi oluşturularak hibritleştirildikleri gösterilmiştir [11-13]. Yenilenebilir enerji uygulamalarında şebeke entegrasyonu alanında, batarya ve ultrakapasitör güneş enerjisi sistemleri ile kullanılan en yaygın hibrit enerji depolama sistemidir [14,15]. Hibrit enerji depolama sistemi kullanılması, gelecekte çeşitli uygulamalarda elverişli bir çözüm olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, fizibiliteelerini göstermek ve işlevselliklerini geliştirmek için daha fazla araştırma ve geliştirme yapılmaktadır [16,17].

Batarya enerji depolama sistemi, rüzgâr veya güneş enerjisi üretiminde güç dalgalanmaların azaltılması için günümüz teknolojik altyapısında mevcut olarak kullanılan en uygun çözüm aracıdır [18,19]. Ayrıca enerji depolama biriminin kontrol algoritmasının belirlediği zaman aralıklarında devreye girerek fotovoltaiik panel veya rüzgâr enerjisinin çıkışındaki güç dalgalanması oranı düşürülmektedir [20, 21].

Bu çalışmanın amacı; açık deniz rüzgâr ve akıntı enerjilerinden hibrit güç üretim sistemi modeli oluşturmak ve batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sistemini entegre ederek akıllı enerji yönetim algoritmasıyla talep tarafındaki ihtiyacı sürekli olarak karşılamak ve kaliteli elektrik üretmektir. Böylelikle sistem modeli gerçek üretim aşamasına geçilmeden önce sistem dinamik davranışlarının incelenmesinde yardımcı olacaktır.

2. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

Şekil 1’de HGÜS ile HEDS entegre edilerek akıllı enerji yönetim algoritmasıyla kontrol edilen yapının MATLAB/Simulink blok diyagramı verilmektedir. Bu çalışmada, açık deniz rüzgâr jeneratörü, yüzeysel akıntı jeneratörü ve bu güç üretim sistemlerine bağlı bulunan redüktör ve DA/DA yükseltici dönüştürücüleri, batarya ve ultrakapasitör gurubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücüleri simüle edilerek gerilim tabanlı evirici kontrol algoritması ve akıllı enerji yönetim algoritması ile sistemin benzetimi gerçekleştirilmektedir.

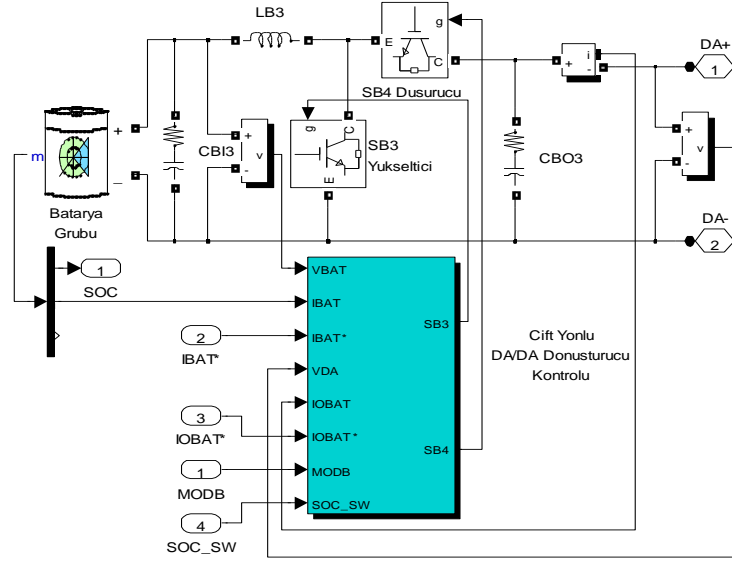


Şekil 1. HGÜS, HEDS ve akıllı enerji yönetim algoritmasının MATLAB/Simulink blok diyagramı

Rüzgâr ve deniz akıntı enerjisinden elde edilen mekanik enerjinin, elektrik enerjisine dönüştürülmesi işleminde, Futureenergy marka 48V 1kW Permanent Magnet Generator (Sabit Mıknatıslı Jeneratör)’ün katalog güç değerleri kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Aynı şekilde sistemde kullanılacak olan genel lityum batarya ve Maxwell marka ultrakapasitör gurubu simüle edilerek sistem analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri ayrıntılı olarak Tablo 1’de verilmektedir.

2.1. Rüzgâr ve Deniz Akıntı Jeneratörü, DA/DA Yükseltici Devre ve Kontrol Algoritması (Wind and Sea Flow Generator, DC/DC Boost Circuit and Control Algorithm)

Şekil 1’de, (1) numaralı blokta rüzgâr jeneratörü, DA/DA yükseltici dönüştürücü ve PI DA bara gerilim kontrol algoritması bulunmaktadır. Rüzgâr jeneratörü, DA/DA yükseltici dönüştürücü ve PI DA bara gerilim kontrol algoritmasının MATLAB/Simulink blok diyagramı Şekil 2’de verilmektedir. PI DA bara gerilim kontrol algoritması DA/DA yükseltici sayesinde 48V olan çıkış gerilimini 400V olacak şekilde denetler. Rüzgâr jeneratörünün üretmiş olduğu gerilim değeri rüzgâr hızına bağlı olarak değişim göstermektedir. DA/DA yükseltici devre sayesinde giriş gerilimindeki değişimlere karşı çıkış gerilimi sürekli olarak 400V’ta sabit tutulmaktadır.

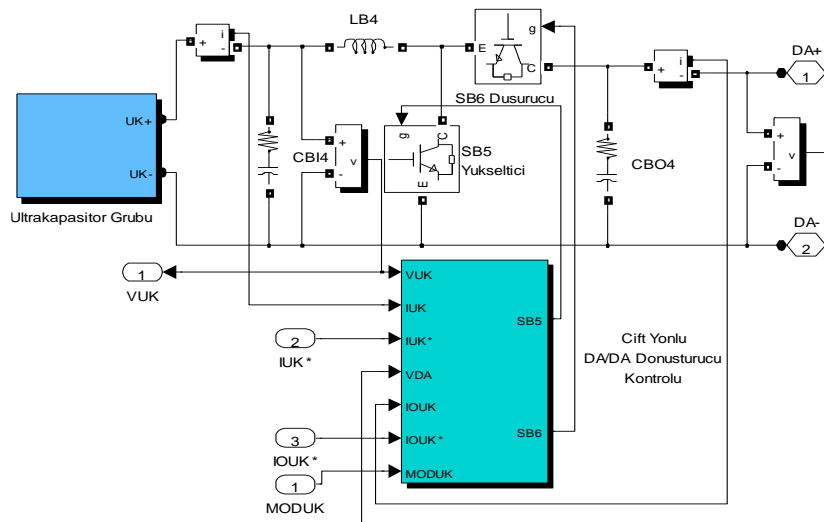


Şekil 3. Batarya grubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ve kontrol birimi blok diyagramı

2.3. Ultrakapasitör Gurubu ve Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü (Ultracapacitor Group and Bidirectional DC/DC Converter)

Şekil 4'te ultrakapasitör gurubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol birimi MATLAB/Simulink benzetim modeli verilmektedir. Batarya gurubunda olduğu gibi ultrakapasitör gurubunun şarj/deşarj olmasını sağlamak için DA/DA çift yönlü dönüştürücü yapısı kullanılmaktadır. Maxwell marka 16V 58F ultrakapasitör modüllerinden 6 adet kullanılarak, 48V gerilimi elde edilmiştir. Ultrakapasitör gurubundan elde edilen toplam enerji kapasitesi 12.6Wh'tir. HEDS birimi olan ultrakapasitör gurubu DA baraya bir çift yönlü DA/DA dönüştürücü aracılığıyla bağlanmıştır.

Batarya gurubu ile karşılaştırıldığında ultrakapasitör gurubunun enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Ultrakapasitör gurubu batarya gurubuna göre çok daha büyük güç yoğunluğuna sahip olduğundan daha kısa zaman periyodunda çok daha büyük güç desteği sağlayabilir. Buna karşın batarya gurubu daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu nedenle ultrakapasitör gurubu ile karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolayabilir ve daha uzun süre enerji sağlayabilir. Birbirini tamamlayıcı özelliklerinden dolayı ultrakapasitör enerji depolama ünitesiyle anlık, batarya enerji depolama ünitesiyle sürekli güç ihtiyacı karşılanmaktadır. Böylelikle batarya gurubu ve ultrakapasitör gurubu ile hibrit enerji depolama sistemi oluşturulmaktadır.



Şekil 4. Ultrakapasitör gurubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ve çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol birimi blok diyagramı

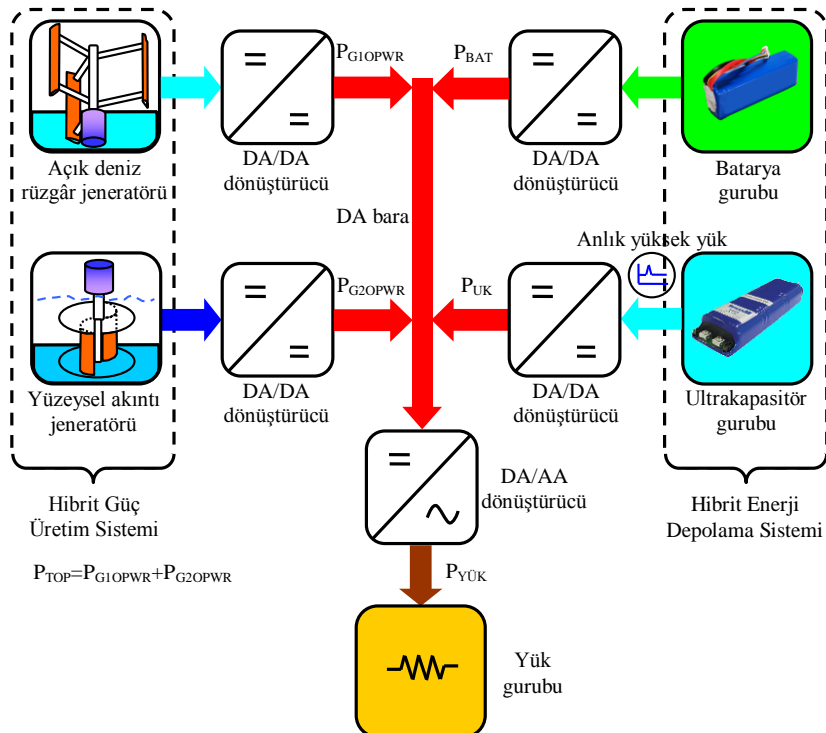
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMA SONUÇLARI (SIMULATION STUDIES RESULTS)

HGÜS ve HEDS olası çalışma durumları ile rüzgâr ve deniz akıntı hız değerleri Tablo 2’de ayrıntılı olarak verilmektedir. Durum 6’da $P_{TOP} < P_{YÜK}$ olduğunda; P_{BAT} ve P_{UK} doluluk durumlarının yüksek olduğu olası çalışma koşulu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5’te verilmektedir. Bu durumda ani yük talep ihtiyacı durumunda ultrakapasitör gurubunun batarya gurubuna destek olarak DA bara dalgalanmasının önüne geçildiği incelenmiştir. Akıllı enerji yönetim algoritmasının sistemin hızla değişen dinamik davranışına verdiği tepkisi sırasıyla Şekil 9-11’de görülmektedir.

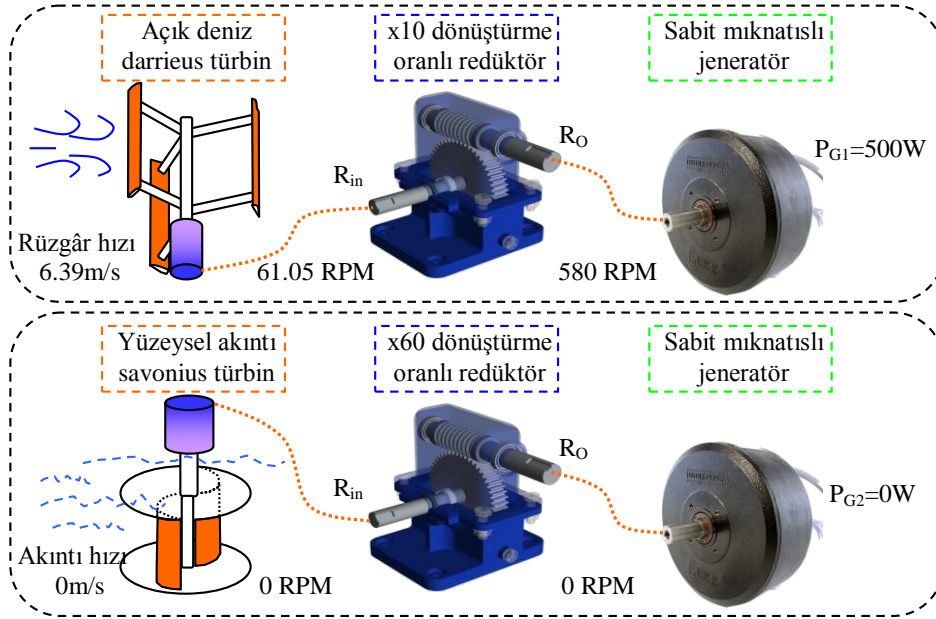
Tablo 2. HGÜS ve HEDS olası çalışma durumları

Durumlar	$P_{TOP} = P_{G1OPOWER} + P_{G2OPOWER}$	Batarya Doluluk Durumu (SOC)	Ultrakapasitör Doluluk Durumu (V_{UC})	Rüzgâr Türbin Hızı (m/s)	Deniz Akıntı Hızı (m/s)
	$P_{TOP}/P_{YÜK}$ Karşılaştırma				
1	$P_{TOP} \approx P_{YÜK}$	Düşük	Düşük	7.71	1.28
2	$P_{TOP} \approx P_{YÜK}$	Yüksek	Yüksek	8.81	1.06
3	$P_{TOP} > P_{YÜK}$	Düşük	Düşük	7.71	1.28
4	$P_{TOP} > P_{YÜK}$	Yüksek	Yüksek	6.39	0.80
5	$P_{TOP} < P_{YÜK}$	Düşük	Düşük	6.39	0
6	$P_{TOP} < P_{YÜK}$	Yüksek	Yüksek	6.39	0
7	$P_{TOP} = 0$	Düşük	Düşük	0	0
8	$P_{TOP} = 0$	Yüksek	Yüksek	0	0
9	$P_{YÜK} = 0$	Düşük	Düşük	4.85	0.99

Şekil 6’da Durum 6 için HGÜS simülasyon parametre değerleri verilmektedir. Bu durumda Darrieus tipi rüzgâr türbini 6.39 m/s rüzgâr hızıyla dönmektedir. Rüzgâr türbinine bağlı olan redüktör ile dönüştürme oranı yükseltilecek (x10) jeneratöre 580 RPM hızı ile aktarılacak jeneratör tarafından 500W güç üretilmektedir. Durum 6’da deniz akıntı Savonius türbini durağan halde olup sisteme bir enerji akışı sağlamamaktadır.

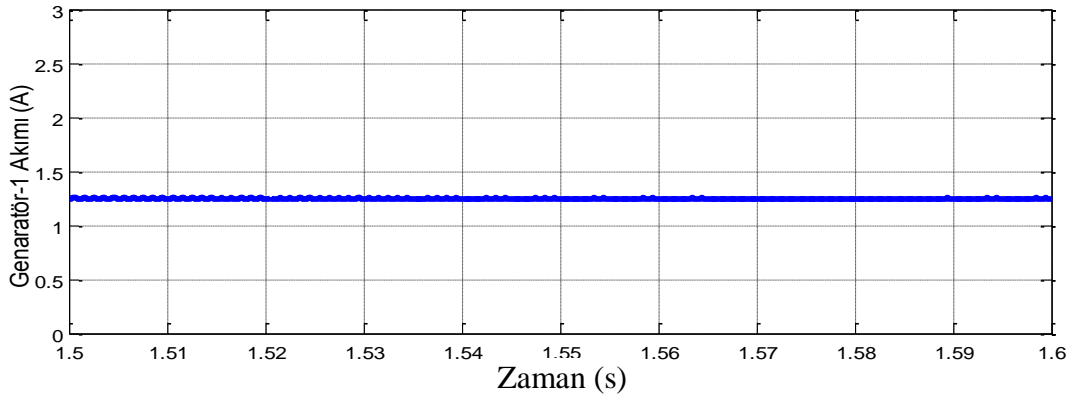


Şekil 5. Sistemin Durum 6 için güç akış diyagramı



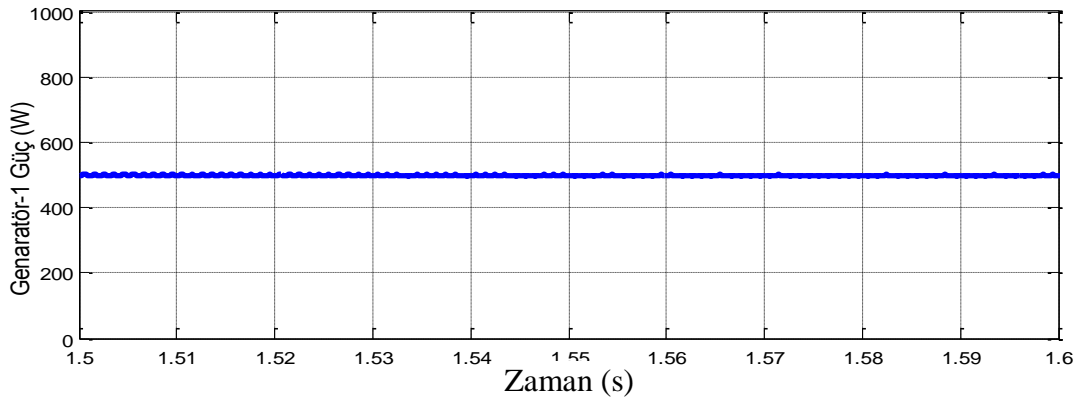
Şekil 6. $P_{TOP} < P_{YÜK}$ olduğunda; HGÜS simülasyon parametre değerleri

Şekil 7'de rüzgâr jeneratörüne bağlı DA/DA yükseltici devre çıkış akım grafiği verilmektedir. Açık deniz rüzgâr jeneratörü 6.39m/s hızla esen rüzgârda 500W gücünde elektrik enerjisi üretmektedir. Jeneratör çıkışında yaklaşık olarak 1.3A akım üretilmektedir.



Şekil 7. Durum 6 için açık deniz rüzgâr jeneratör devresi çıkış akımı

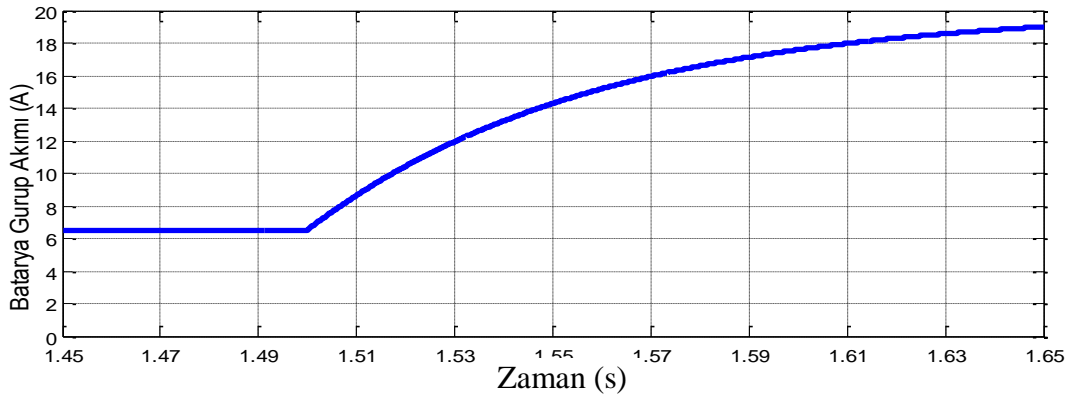
Jeneratörden üretilen güç 500W olmakla birlikte Şekil 8'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Jeneratör tarafından üretilen güç DA/DA yükseltici devresiyle sisteme aktarılmaktadır. Deniz akıntı jeneratöründen bir güç üretilmediği için burada bulunan DA/DA yükseltici devresi pasif haldedir.



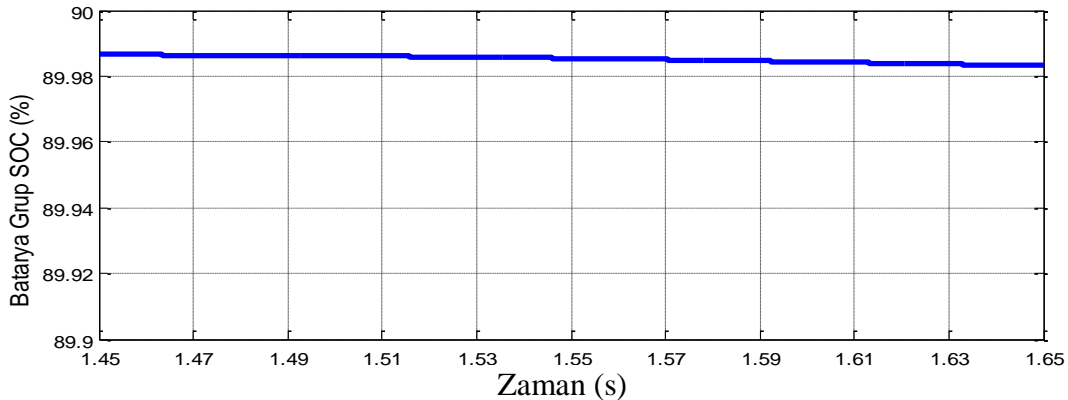
Şekil 8. Durum 6 için açık deniz rüzgâr jeneratör devresi çıkış gücü

Durum 6'da rüzgâr jeneratöründen 500W üretilmekte ve yük gurubunun talep ettiği güç miktarı 800W'tır. P_{FARK} güç değeri -300W olarak akıllı enerji yönetim algoritması tarafından hesaplanmaktadır. Fark gücün negatif çıkması sistemde bulunan HEDS'deki batarya gurubunu devreye alması anlamına gelmektedir. Bu fark gücü kadar batarya gurubunun deşarj olması gereken referans akım değeri hesaplanarak sisteme DA bara üzerinden güç akışı sağlanır. Şekil 13'te sistemin çalışması sırasında 1.5s'de aniden 1000W'lık bir yük talebi devreye alınmaktadır. Akıllı enerji yönetim algoritması bu ani yük talebini algılayarak ultrakapasitör gurubunu devreye almaktadır. Ultrakapasitör gurubunun deşarj olması gereken referans akım değeri hesaplanarak çift yönlü DA/DA dönüştürücü devresine gönderilir. Daha sonra ultrakapasitör gurubu, yükün uzun süreli olarak batarya gurubundan karşılanması için devreden çıkararak bütün güç batarya gurubu tarafından sağlanır. Burada akıllı enerji yönetim algoritması ve ultrakapasitör sayesinde batarya gurubunun ani deşarj (deep discharge) olmasının önüne geçilerek batarya gurubunun çevrim ömrünün uzatılması sağlanmaktadır.

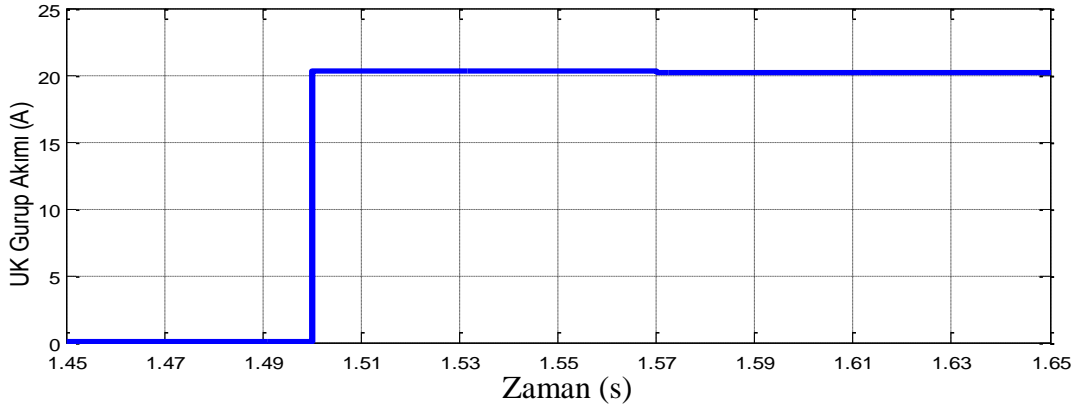
Şekil 9'da Durum 6 için ani yük değişim çalışma koşulundaki batarya gurubunun akım grafiği ayrıntılı olarak verilmektedir. Batarya gurubu 1.5s'de akıllı enerji yönetim algoritmasının hesapladığı akım değerine göre deşarj olmaktadır. Şekil 10'da batarya gurubunun doluluk seviyesi SOC ayrıntılı olarak verilmekte ve %90 seviyesinden başlayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 11'de ultrakapasitör gurubunun akım grafiği verilmektedir. Ultrakapasitör gurubu ani yükün devreye girdiği anda DA/DA yükseltici devresi aracılığıyla devreye alınarak sistemdeki gerilim ve güç dalgalanmalarının önüne geçilmektedir.



Şekil 9. Durum 6 için batarya gurubu giriş akımı

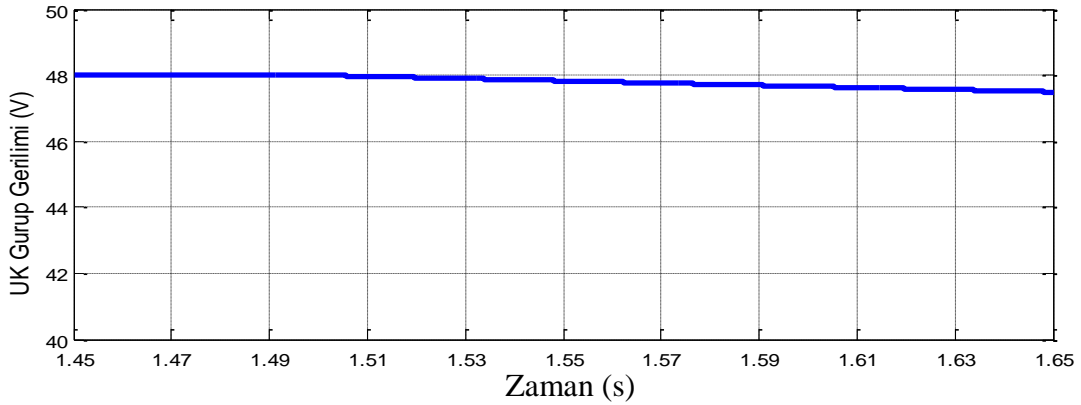


Şekil 10. Durum 6 için batarya gurubu SOC doluluk durumu



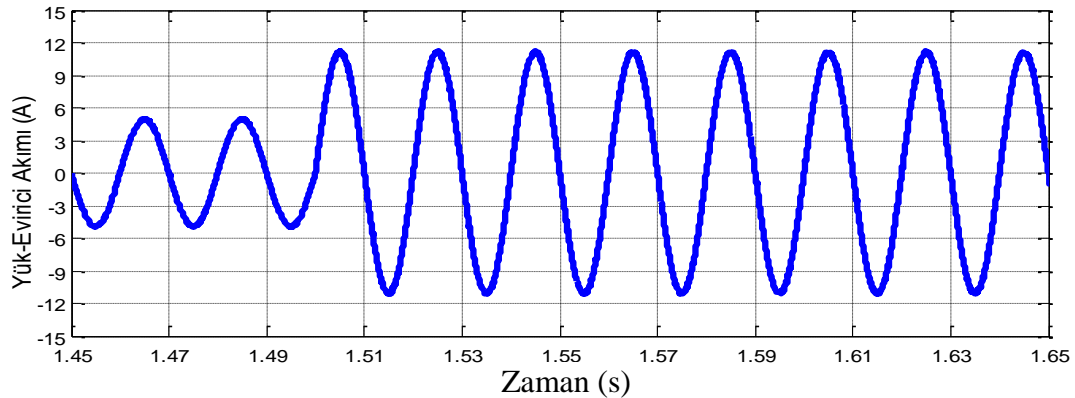
Şekil 11. Durum 6 için ultrakapasitör gurubu giriş akımı

Ultrakapasitör gurubu, sisteme ani yük talebi girdiğinde bu güç ihtiyacı, akıllı enerji yönetim algoritması tarafından algılanarak devreye alınmaktadır ve hesaplanan 20A akım değerinde deşarj edilmektedir. Şekil 12'de ani yük talebi sırasında deşarj olan ultrakapasitör gurubunun terminal uçlarındaki gerilim grafiği verilmektedir. Ultrakapasitör gurubunun yapısal özelliği olan düşük güç enerji yoğunluğuna sahip olmasından terminal uçlarındaki gerilim değeri çok hızlı bir şekilde düşmektedir.

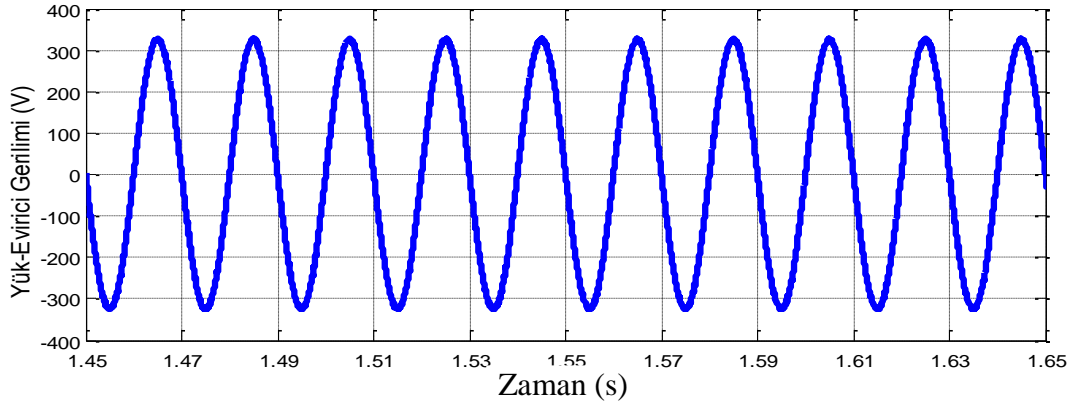


Şekil 12. Durum 6 için ultrakapasitör gurup terminal gerilimi

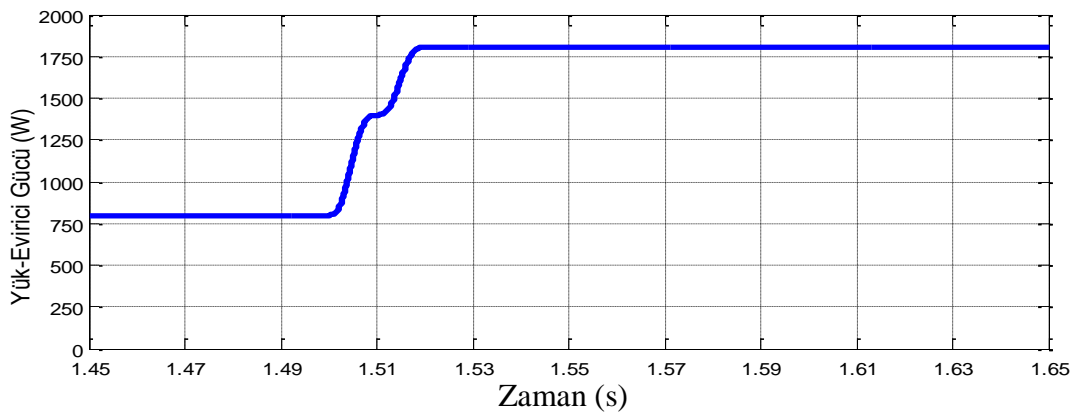
Şekil 13'te Durum 6 için sistemde bulunan yük gurubunun akım değişim grafiği verilmektedir. Yük gurubu ilk olarak 800W güç talep etmekte, 1.5s'de 1000W ilave güç devreye alınarak toplamda 1800W güç talep edilmektedir. Evirici ve yük gurubunun gerilim grafiği Şekil 14'te ayrıntılı olarak verilmektedir. Evirici çıkışı 220V RMS gerilim değerinde ve 50Hz frekans ile yük gurubunu beslemektedir. Yük gurubunun talep ettiği güç değişim grafiği Şekil 15'te verilmektedir. Yük gurubu eviriciden ani yük talep etmesine rağmen evirici geriliminde olası bir gerilim dalgalanması olmamaktadır.



Şekil 13. Durum 6 için yük ve evirici akımı



Şekil 14. Durum 6 için yük ve evirici gerilimi



Şekil 15. Durum 6 için yük ve evirici gücü

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, rüzgâr ve deniz akıntı enerjisi ile enerji depolama sisteminin her bir biriminin simülasyonu MATLAB/Simulink arayüzü ile yapılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynağı, rüzgâr ve deniz akıntı enerji ve enerji depolama birimi birincil olarak yükün talep etmiş olduğu gücü sağlamaktadır. Böylece kaliteli ve sürekli bir enerji transferi gerçekleştirilmektedir.

Sistemdeki tüm birimlerin akıllı enerji yönetim algoritması ile kontrol edilerek sistemin ani yük değişikliklerine hızlı tepki vererek gerilim ve güç dalgalanmasının önüne geçildiği tespit edilmiştir.

Birbirini tamamlayıcı özelliklerinden dolayı ultrakapasitör enerji depolama ünitesiyle anlık, batarya enerji depolama ünitesiyle sürekli, güç ihtiyacı karşılanmıştır.

Bunun yanı sıra simülasyon çalışmalarında alınan sonuçlarla, ultrakapasitörün de hem DA bara da hem de yük tarafında gerilim çökmesini engellediği görülmüştür. Batarya ve ultrakapasitör hibrit enerji depolama sistemi ile enerjinin sürekliliğinden yararlanılarak, YEK'in daha etkin bir şekilde kullanılması sağlanmıştır. Batarya ve ultrakapasitörden oluşan HEDS ile bataryaların ömrünü ve depolama kapasitesini maksimum şekilde kullanmayı ve şarj/deşarj çevrimini de minimum seviyeye getirebileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, 117E767 numaralı TÜBİTAK 1001 projesiyle desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hemmati, R., Saboori, H., 2016. "Emergence of Hybrid Energy Storage Systems in Renewable Energy and Transport Applications - A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65(1), 11-23.
- [2] Khalid, M., Savkin, A., Agelidis, V., 2016. "A Method for Minimizing Energy Cost in a Microgrid With Hybrid Renewable Power Generation Using Controlled Battery Energy Storage", *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, 8596-8600.
- [3] Borg, M., Wang, K., Collu, M., Moan, T., 2014. "A Comparison of Two Coupled Model of Dynamics for Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbines (VAWT)", *33rd International Conference on Ocean Proceedings of the ASME*, 1-10.
- [4] Borga, M., Collua, M., 2014. "A Comparison on The Dynamics of a Floating Vertical Axis Wind Turbine on Three Different Floating Support Structures", *Energy Procedia*, 53 (1), 268-279.
- [5] Bertram, V., 2015. "Advanced CFD Analyses for Offshore Wind Power Installations", *OCEANS*, 1-5.
- [6] Hand, B., Cashman, A., Kelly, G., 2015. "An Aerodynamic Modelling Methodology for an Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbine", *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 273-277.
- [7] Jin, X., Zhao, G., Gao, K., Ju, W., 2015. "Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Basic Research Methods", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 (1), 212-225.
- [8] Shahariar, G. M., Hasan, M. R., 2014. "Design & Construction of a Vertical Axis Wind Turbine", *9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 326-329.
- [9] Triviino, P. G., Ramirez, L. M., Mena, A. J., Iborra, F., Vazquez, C. A., Jurado, F., 2016. "Optimized Operation Combining Costs, Efficiency and Lifetime of a Hybrid Renewable Energy System with Energy Storage by Battery and Hydrogen in Grid-Connected Applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (1), 23132-23144.
- [10] Amrouche, S. O., Rekioua, D., Rekioua, T., Bacha, S., 2016. "Overview of Energy Storage in Renewable Energy Systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (1), 20914-20927.
- [11] Amy, T., Kong, H., Auger, D., Offer, G., Longo, S., 2016. "Regularized MPC for Power Management of Hybrid Energy Storage Systems with Applications in Electric Vehicles", *ScienceDirect IFAC Papers OnLine*, 49 (11), 265-270.
- [12] Song, Z., Hou, J., Hofmann, H., Li, J., Ouyang, M., 2017. "Sliding-Mode and Lyapunov Function-Based Control for Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Used in Electric Vehicles", *Energy*, 122 (1), 601-612.
- [13] Lee, S., Kim, J., 2017. "Implementation Methodology of Powertrain for Series-Hybrid Military Vehicles Applications Equipped with Hybrid Energy Storage", *Energy*, 120 (1), 229-240.
- [14] Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., Isa, D., 2016. "An optimal control strategy for standalone PV system with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System", *Journal of Power Sources*, 331 (1), 553-565.
- [15] Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., Isa, D., 2017. "Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household", *Energy Procedia*, 107 (1) 232-236.

- [16] Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., Isa, D., 2016. “An optimal control strategy for standalone PV system with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System”, *Journal of Power Sources*, 331 (1), 553-565.
- [17] Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., Isa, D., 2017. “Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household”, *Energy Procedia*, 107 (1) 232-236.
- [18] Li, X., Hui, D., Lai, X., 2013. “Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4 (2), 464-473.
- [19] Shen, D., Izadian, A., Liao, P., 2014. “A Hybrid Wind-Solar-Storage Energy Generation System Configuration and Control”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 436-442.
- [20] Atia, R., Yamada, N., 2016. “Sizing and Analysis of Renewable Energy and Battery Systems in Residential Microgrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7 (3), 1204-1213.
- [21] Bocklisch, T., Lindner, J., 2016. “Technical and Economic Investigation and Comparison of Photovoltaic-Wind Energy-Hybrid Systems with Battery and Heat Storage Path”, *Energy Procedia*, 99 (1), 350-359.



Doğrusal Olmayan Yüklerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi ve Harmonik Bileşenlerin Süzülmesi

Süleyman ADAK^{1,*}, Hasan Cangi², Ahmet Serdar YILMAZ³

¹Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 47100, Artuklu/MARDİN

^{2,3}Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mimarlık Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2018, KAHRAMANMARAŞ

Öz

Toplam harmonik distorsiyonu özellikle güç elektronik ekipman ve doğrusal olmayan yüklerin kullanılmasından sonra güç kalitesinin önemli bir konusu oldu. Elektrik sistemlerinin arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi, akım ve gerilim gibi büyüklüklerin 50 Hz frekansta ve sinüsoidal formda olmasına bağlıdır. Bununla birlikte bir çok nedenlerden dolayı bu temel büyüklükler sinüsoidal özelliklerini kaybederek sistemde istenmeyen harmonikler oluşmaktadır. Harmonik distorsiyonun azaltılması ve güç faktörünü iyileştirilmesi için pasif filtrelerin kullanılması çokca tercih edilen bir yöntemdir. İncelenen güç sistemi, üç fazlı gerilim kaynağı, güç trafosu, altı darbeli kontrolsüz doğrultucu, pasif filtre ve R-L endüktif yükünden oluşmaktadır. Altı darbeli kontrolsüz bir doğrultucu 5, 7, 11, 13, 17, 19 v.b. gibi akım harmonik bileşenleri üretir. Üç fazlı kontrolsüz doğrultucunun giriş akımı toplam harmonik distorsiyonunu azaltmak için pasif filtre kullanılmıştır. Güç sistemi Matlab/Simulink programı kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon sonuçları, hem harmoniklerin elimine edildiğini hem de güç katsayısının düzeltildiğini göstermektedir. Pasif filtreler kullanmadan önce güç sistemindeki güç katsayısı 0.6877 ve THD₁ değeri ise % 12.71 olarak ölçülmüştü. Pasif filtreler kullanıldıktan sonra ise sistemdeki güç katsayısı 0.99 ve THD₁ değeri ise % 3.591 olarak gerçekleşmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 16/08/2018
Düzeltilme: 24/10/2018
Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Toplam harmonik distorsiyonu
Doğrusal olmayan yükler
Pasif süzgeçler

Keywords

Total harmonic distortions
Non-linear loads
Passive filters

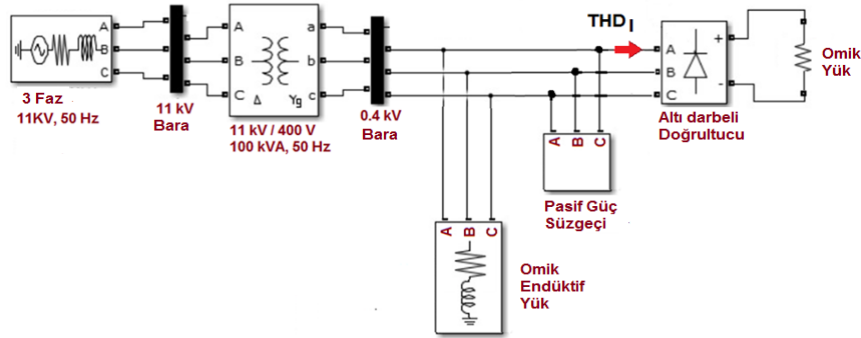
Filtration of Harmonic Components and Correction Power Factor in Nonlinear Loads

Abstract

Total harmonic distortion has become an important subject in power quality, especially after use of power electronic equipment and non-linear loads. Working of electricity systems smoothly and safety depends on the foundation of quantities such as current and voltage which are sinusoidal and 50 Hz frequency. However, these foundation quantities lose their sinusoidal characteristics because of many reasons and this occurs unwanted harmonics in the system. It is a highly preferred method to use passive filters for reduction harmonic and to improve the power factor. The proposed power system is a combination of three-phase voltage supply, power transformer, six-pulse rectifier, passive filter, and R-L inductive load. A six-pulse uncontrolled rectifier produces 5th, 7th, 11th, 13th, 17th, 19th, etc. current harmonic components. A passive filter is used to reduce the total harmonic distortion of the input current of the three-phase uncontrolled rectifier. Power system is modeled by using Matlab/Simulink program. Simulation results show that both the harmonics are eliminated and the power coefficient is corrected. Before using passive filters the power coefficient was 0.6877, and the THD₁ value was measured as 12.71 % in the power system. After using passive filters, the power coefficient was 0.99 and the THD₁ value was measured as 3.591 % in power system.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin üretimi iletimi ve dağıtımı esnasında sırasında akım ve gerilimin dalga formunun sinüzoidal formda ve 50Hz frekansta olması istenir. Bu koşul kaliteyi belirleyen ana faktörlerden biridir. Bununla birlikte birçok nedenden dolayı bu temel büyüklükler temel özelliklerini kaybederek, sistemde istenmeyen harmoniklerin oluşmasına neden olurlar [1, 3]. Bir harmonik “periyodik bir dalganın, temel frekansının tam katı olan bir frekansa sahip sinüs biçimli bileşeni” olarak tanımlanır. Harmonikler, bir elektrik sisteminde temel frekansın bazı tam katlarında ortaya çıkan akımlar ve gerilimler olarak dikkate alınırlar. Güç sisteminin prensip şeması şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Güç sisteminin prensip şeması

Güç elektroniği tabanlı konvertörler, kıyıcıları ile kesintisiz güç kaynaklarının kullanımının hızla artması ve uygulama alanları nedeniyle, elektrik sistemlerinde gözlenen harmonik distorsiyon giderek artmakta ve bunun sonucunda oluşan harmonik bileşenler enerji kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Harmonik distorsiyonun değeri yükselmesi işletmedeki cihazlara zarar vermekte ve ayrıca sistemdeki kesicilerin zamansız açmalarına, bilgisayarların titreşimli çalışmasına neden olmaktadır. Bir fazlı güç elektroniği tabanlı cihazlar etkin olarak üç ve üçün katı harmonik bileşen üretirler [2, 4]. Aydınlatmada kullanılan elektronik balastlı aydınlatma sistemleri ve deşarj tüpleri de önemli bir üçüncü harmonik kaynağıdır. Bir harmonik “periyodik bir dalganın, temel frekansının tam katı olan bir frekansa sahip sinüs biçimli bileşeni” olarak tanımlanır. Harmonikler, bir elektrik sisteminde temel frekansın bazı tam katlarında ortaya çıkan akımlar ve gerilimler olarak dikkate alınırlar [5, 6]. Harmonik bileşenlerin frekansları,

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (1)$$

formülü ile ifade edilir. Bu ifadeye; n harmonik mertebesi, f_1 temel frekansı göstermektedir. (1) denkleminde göre, üçüncü harmonik bileşen, $f_3=150\text{Hz}$, beşinci harmonik bileşen, $f_5=250\text{Hz}$ olarak hesaplanır. Alışveriş merkezlerinde ticari binalarda sık, sık karşılaşılan ve tek fazlı ofis cihazlarından kaynaklanan 3 ve 3’ün katı harmonikler nötr hattında devrelerini tamamlarlar. Nötr hattı aşırı ısınır ve ek olarak bu tesislerde nötr-toprak arası gerilimlerin artması sonucu elektronik cihazlarda arızalar oluşmaktadır [7, 9].

Güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin elimine edilmesi ile ilgili literatürde bir çok çalışmalar bulunmaktadır. [13] nolu makalede harmonik bileşenlerin aktif ve pasif filtreler ile elimine edilmesi üzerinde çalışılmıştır. [2] nolu ise makalede çok seviyeli inverterde üçüncü harmonik bileşenin enjekte edilmesi ile harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayankarakteristikli elemanlar güç sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler.Güç sisteminin güvenilir ve kararlı çalışmasını sağlamak için, tasarım ve işletme aşamasında doğrusal olmayan elemanların veya nonsinüsoidal kaynakların meydana getirdiği harmonik bileşenler hesaplanarak veya ölçülerek ortaya konması vegerekli tedbirlerin alınması gerekir.

2. PASİF FİLTRELER VE GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ (MODELING OF POWER SYSTEM AND PASSIVE FILTERS)

Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarım esnasında bazı önlemler alınır.Bu önlemler yeterli olmayıp harmonic bileşenlerin şebekeye geçmesini engellemek lazımdır.Harmonik bileşenlerin süzülmesini sağlayan devrelere harmonik süzgeçleri denir.Genellikle güç sisteminde etkin harmonik bileşen için hesap yapılır. Etkisi daha az olan harmonik bileşenler için zayıflatan süzgeç devresi tasarlanır.

Pasif filtrelerde amaç yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her harmonik bileşen için onu onu rezonansa getirecek ayrı bir süzgeç kolu konulması gerekir.Pasif süzgeçler endüktif ve kapasitif reaktansları birbirine eşit yapan frekansa ayarlanabilir [6, 8].Kalite faktörü Q ayar keskinliğini belirlemektedir.Q faktörüne bağlı olarak süzgeç yada yüksek geçiren yada alçak geçiren tiptedir. Süzgeç hesaplamalarında kompanze edilecek güç formülünden faydalanılır.Güç sisteminde kompanzasyon için gerekli reaktif güç değeri;

$$Q_{Kom} = P \left[\tan(\cos^{-1} \varphi_1) - \tan(\cos^{-1} \varphi_2) \right] \quad (2)$$

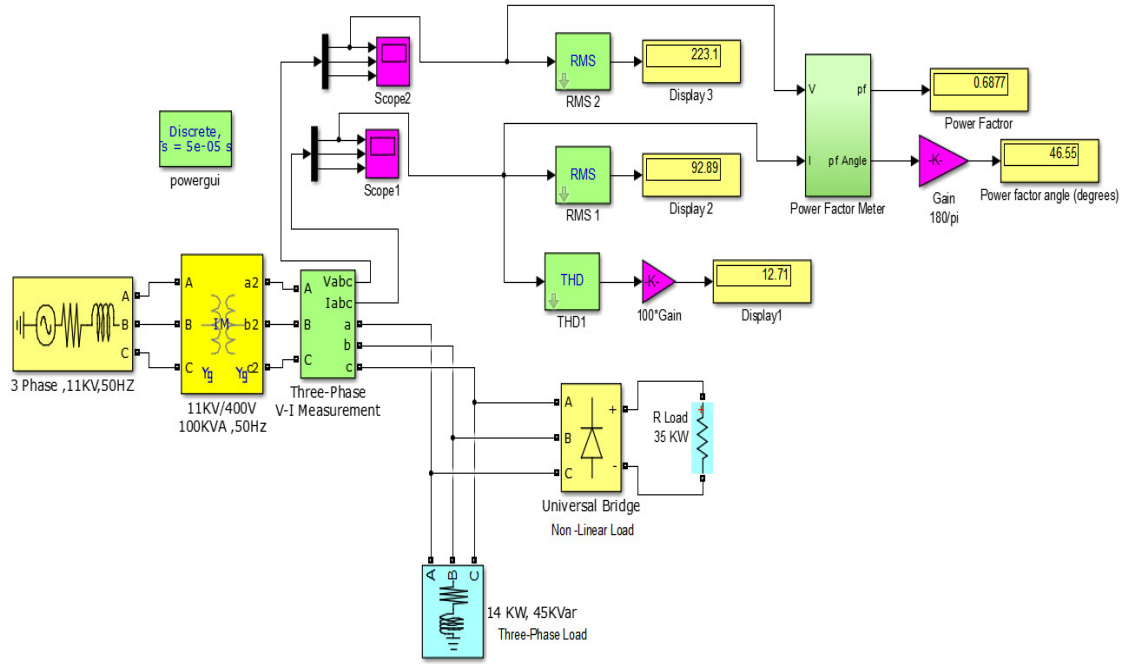
formula ile bulunur. Burada, $\cos \varphi_1$ kompanzasyon öncesi güç katsayısını, $\cos \varphi_2$, kompanzasyon sonrası güç katsayısını P, güç sisteminin aktif gücünü göstermektedir. Bulunan bu reaktif gücün pasif süzgeçlere dağılımı;

$$Q_{fh} = Q_{Kom} \frac{I_h}{\sum I_h} \quad h = 2,3 \dots \dots \quad (3)$$

formülü ile belirlenir. Burada, Q_{fh} , h. harmonik bileşene ait reaktif gücü, Q_{Kom} , güç sisteminde kompanzasyon için gerekli reaktif gücü, I_h , h. harmonik akım bileşenin genliğini, $\sum I_h$, harmonik akımların toplamını göstermektedir. Harmonik büyüklüklerin sınırlandırılmasını amaçlayan harmonik standartlarında çok sıklıkla kullanılan toplam harmonik distorsiyonu, akım için,

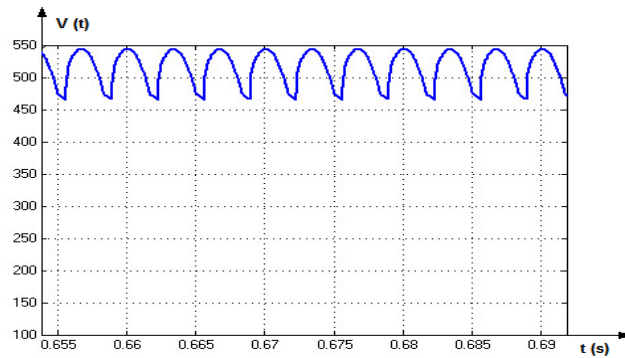
$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{neff}^2}}{I_{eff}} \quad (4)$$

ifadesinden yararlanarak bulunur. Harmonik bileşenlerin efektif değerlerini, temel bileşen efektif değerine oranıdır [10].Genellikle yüzde olarak ifade edilir.Bu değer doğrusal olmayan dalga formunun sinus dalga formundan sapmasının bir ölçütüdür.Filtreleme öncesi güç sistemine ilişkin prensip şeması Şekil 2.'de verildiği gibidir.



Şekil 2. Güç sisteminin simulink eşdeğeri (filtreleme öncesi)

Harmonik akım ve gerilimlerinin genlikleri mertebesi ile ters orantılıdır, mertebe büyüdükçe harmonik genliği azalır. Harmonik bileşenler akımları harmonik kaynağından, güç sisteminde en düşük empedansa doğru akarlar. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarıdır. Kısacası sistemdeki tüm elemanları etkilediğinden, harmonikler enerji sistemlerinde istenmeyen niceliklerdir. Non-sinüsoidal dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır [11, 15]. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara "harmonik bileşen" adı verilir. Güç sistemindeki altı darbeli kontrolsüz doğrultucu çıkış gerilimi dalga formu Şekil 3'te verildiği gibidir.



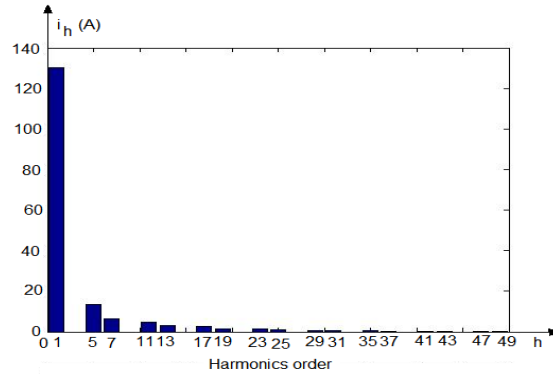
Şekil 3. Altı darbeli doğrultucu çıkış gerilimi

Pasif süzgeçler endüktans, kapasite ve omik dirençten oluşur. Pasif süzgeçler temel bileşen dışındaki harmonik bileşenleri elimine ederler. Kaynak ile yük arasında yerleştirilirler. Elimine edilecek harmonik bileşenlere ait frekans değerinde L ve C elemanlarının rezonansa gelmesi sağlanır. Güç sisteminde ki üç fazlı kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri genlik ve faz açıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Güç sistemindeki harmonik bileşenler (filtreleme öncesi)

Harmonik bileşenler	Harmonik bileşenlerin genliği (A)	Harmonik bileşenlerin faz açısı (Derece)
h1	130.3	-48.06
h5	13.64	145.7
h7	6.307	118
h11	4.949	-84.74
h13	3.039	-109.4
h17	2.571	42.17
h19	1.66	22.9
h23	1.426	165.3
h25	0.9188	154.2
h29	0.7971	-78.1
h31	0.4823	-78.09
h35	0.4811	28.75
h37	0.2373	37.52
h41	0.3555	132.3
h43	0.1522	133.5
h47	0.2913	118.2
h49	0.1473	-119.7

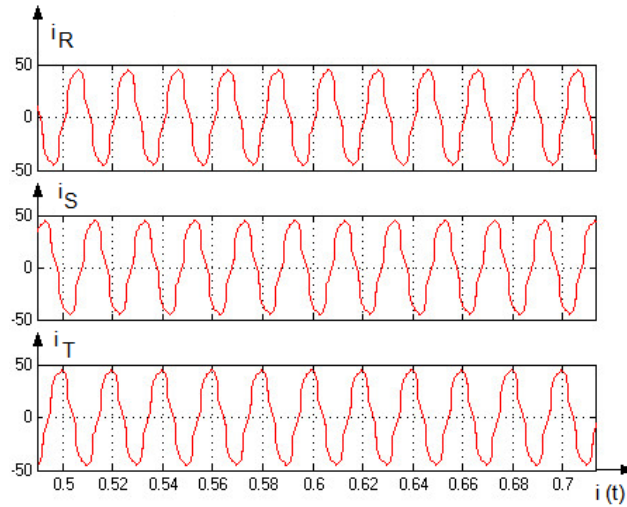
Doğrusal olmayan karakteristikli yükler düşük güçlü olsalarda güç sistemlerinde sinüsoidal akım ve gerilim dalga formunu bozarlar. Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda doğrusal olmayan yükler göz önüne alınırsa bunların sonucunda ek kayıplar ile harmonik bozulma değerlerinin yükselmesine neden olurlar [12, 13]. Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenlerinin genliği Şekil 4'te verildiği gibidir.

**Şekil 4.** Harmonik bileşenler (filtreleme öncesi)

Süzgeç tasarımı yapılırken düşük dereceli harmonik bileşenler için tek ayarlı süzgeçler kullanılır. Harmonik derecesi büyüdükçe her harmonik bileşen için süzgeç tasarlamak ekonomik olmayacağından yüksek geçiren süzgeç tasarımı ile belirli frekansın üstündeki harmonik bileşenler band geçiren süzgeç ile filtrelendir [14, 17].

Kısacası sistemdeki tüm elemanları etkilediğinden, harmonikler enerji sistemlerinde istenmeyen niceliklerdir. Bu yüzden harmonikleri süzecek süzgeç devrelerinin kurulmasına mutlak süratte gerek vardır. Bu sebepten dolayı şebekelere paralel süzgeçler yerleştirilir. Bu paralel süzgeçler içinde bant geçiren ve yüksek geçiren süzgeçler çok sıklıkla kullanılmaktadır [18, 21]. Bu süzgeçler belirlenen harmonik

frekansında rezonans oluşturarak harmonikli dalgayı süzerler. Güç transformatörü sekonder akımlarının değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Güç transformatörü sekonder akımı

Doğrusal olmayan yüklerin sebep olduğu harmonik bileşenlerin güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Rezonans şartları her harmonik bileşen için ayrı, ayrı hesaplanmalıdır. Bir güç sistemine harmonik kaynaklardan enjekte edilen harmonik bileşenlerin olması durumunda, bunlar şebekedeki herhangi bir bileşen ile rezonans oluşturacak şekilde davranır. Yüksek dereceli harmonik bileşenler, tüm güç sistemini etkileyebilir. Bu etkiler güç sistemi ve diğer ekipmanların da performansını azaltır [19, 20].

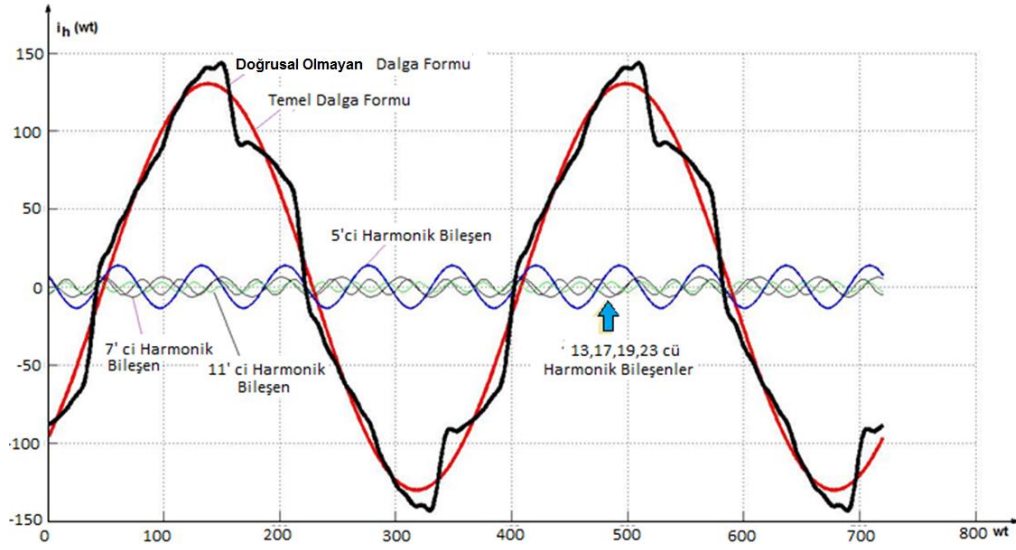
Güç sistemlerinde tek ayarlı filtre, çift ayarlı filtre ve sönümlü filtreler kullanılmaktadır. Tek ayarlı filtreler R, L ve C parametrelerinden oluşur. Düşük empedans veya kısa devre oluşturarak ayarlanan frekanslardaki harmonik akımlarını süzerler. Çift ayarlı süzgeç adından anlaşılacağı gibi iki ayrı frekansa ayarlı olup ayarlandıkları bu frekanslarda düşük empedans göstererek bu frekanslardaki harmonik bileşenleri süzerler. Sönümlü filtreler ise yüksek mertebeli harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılırlar.

3. HARMONİKLERİN ELİMİNASYONU VE GÜÇ KATSAYISININ İYİLEŞTİRİLMESİ (ELIMINATION OF HARMONICS AND IMPROVEMENT OF POWER FACTOR)

Elektrik enerjisinin üretimi iletimi ve dağıtımı esnasında sırasında akım ve gerilimin sinüzoidal formda ve 50Hz frekansta olması istenir. Bu koşul kaliteyi belirleyen ana faktörlerden biridir. Bununla birlikte bir çok nedenden dolayı bu temel büyüklükler temel özelliklerini kaybederek, sistemde harmonik bileşenler oluşmaktadır. Altı darbeli kontrolsüz doğrultucu giriş akımı;

$$i(\omega t) = 130.3 \sin(\omega t - 48.06) + 13.64 \sin(5\omega t + 145.7) + 6.307 \sin(7\omega t + 118) + 4.949 \sin(11\omega t - 84.74) + 3.039 \sin(13\omega t - 109.4) + 2.571 \sin(17\omega t + 42.17) + 1.66 \sin(19\omega t + 22.9) + 1.426 \sin(23\omega t + 165.3) \quad (5)$$

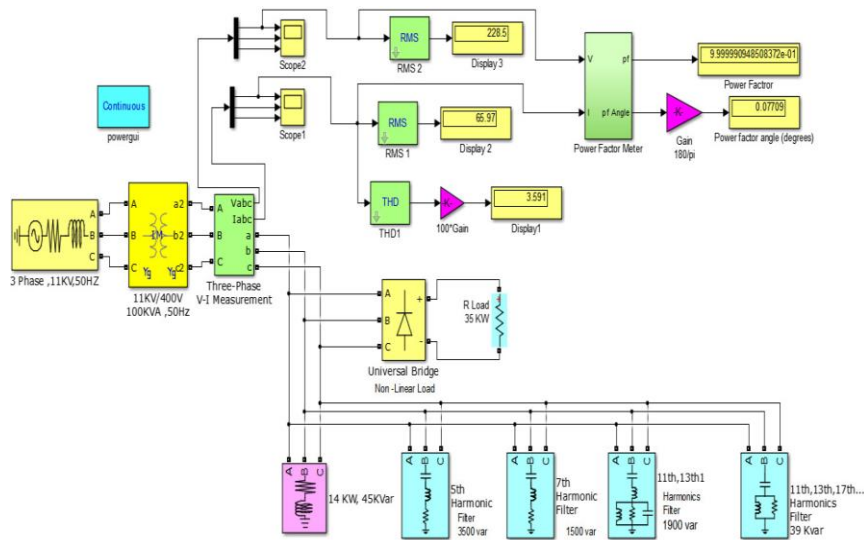
şekindedir. Bu doğrusal olmayan karakteristikli akım dalgasına ilişkin grafik Şekil 6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 6. Doğrusal olmayan dalga formu ile harmonik bileşenleri

Harmonik bileşenleri akımları, harmonik kaynağından, en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedansıdır. Kondansatörlerin reaktansı X_C sistemde harmoniklerin bulunması durumunda değeri X_C/n olacağından kondansatörlerde akım değeri oldukça artar ve bundan dolayı, harmonik bileşenlerin etkili olduğu güç sistemlerinde harmoniklerden en çok kondansatörler etkilenir [20].

Enerji kalitesinin yükselmesi için güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin etkinliğinin azaltılması gerekir. Bu yüzden harmonikleri süzecek süzgeç devrelerinin kurulmasına mutlak surette gerek vardır. Elektrik tesislerinde harmoniklerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan doğrusal olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntının doğrusal olmasından dolayı harmonik bileşenler oluşmaktadır. Manyetik devrelerde aşırı doyma elektrik arkları ve güç elektroniği tabanlı devre elemanlarının anahtarlanması ve kıyılması doğrusal olmayan olaylardır. Pasif süzgeçlerle hem güç katsayısı düzeltilmesi yapılır hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılır. Güç sisteminin filtreleme sonrası prensip şeması Şekil 7'de verilmiştir.



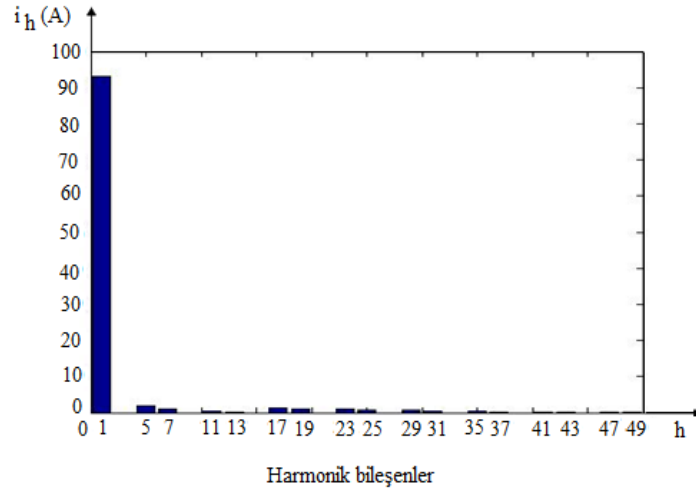
Şekil 7. Güç sisteminin simülasyon eşdeğeri (filtreleme sonrası)

Aşırı doymuş manyetik devreler, arka çalışan işletme araçları ile güç elektroniği sistemleri gibi birçok sistemin akımı ile gerilimi arasındaki bağıntı non-linear olduğundan sistemde harmonikler oluşmaktadır. Akım ve gerilimde oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve bu tesislere bağlı tüketicilere zarar vermekte ve hatta bazen güç sistemlerini çalışamaz hale getirmektedirler. Filtrelemeden sonra üç fazlı kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Güç sisteminde harmonik bileşenler (filtreleme sonrası)

Harmonik bileşenler	Harmonik bileşenlerin genliği (A)	Harmonik bileşenlerin faz acısı (Derece)
h1	93.21	-2.204
h5	2.005	82.21
h7	1.157	87.41
h11	0.4829	-87.78
h13	0.2607	-86.41
h17	1.456	89.37
h19	1.05	73.38
h23	0.9398	-125.3
h25	0.6944	-137
h29	0.5895	20.61
h31	0.4517	12.39
h35	0.3618	165.6
h37	0.2872	160.9
h41	0.215	-51.73
h43	0.176	-52.53
h47	0.1244	85.92
h49	0.103	89.92

Harmonikler transformatörlerde bakır ile demir kayıpları ile kaçak akıların artmasına sebep olurlar. Döner elektrik makinelerinde kayma ve momenti etkileyerek gürültü ve titreşimli çalışmaya sebep olurlar. Aynı zamanda sinüs dalgasının sıfırdan geçişine göre tetikleme yapan sistemlerin yanlış sinyaller vermesine neden olurlar. Harmonikler nedeni ile oluşan rezonans olaylarında sistemdeki sigortaların sıklıkla atmasına, koruma rölelerinin düzensiz çalışmasına ve tüm cihazların ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır. Süzgeçleme sonrası üç fazlı kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenlerin genliği Şekil 8’de verildiği gibidir.



Şekil 8. Güç sistemindeki harmonik bileşenler (filtreleme sonrası)

Şebekede en fazla etkisi görülen harmonikler sırası ile 150 Hz frekanslı üçüncü harmonik, 250 Hz frekanslı beşinci harmonik ve 350 Hz frekanslı yedinci harmoniktir. Üçüncü harmonik bileşen genellikle bir fazlı doğrusal olmayan yükler tarafından üretilir. Doğrusal olmayan yükler tarafından 5. ve 7. harmonik bileşenler üretilir.

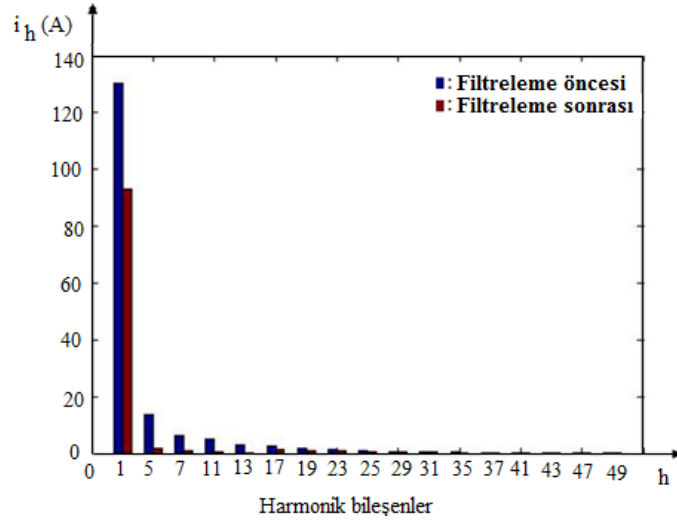
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Üç fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ofislerde ticari binalarda üçüncü harmonik etkin olarak bulunmaktadır. Temel frekanstaki dengeli 3 fazlı akımlar nötr iletkeninde akım oluşturmazlar. Ancak, 3 fazlı sistemlerde 3'lü harmonikler nötr iletkeninde birbirlerini güçlendirirler. Nötr iletkenleri faz iletkenleriyle aynı boyutlarda olduğundan bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem, nötr iletkeninden geçen akımın hesaplanıp buna göre kesit seçimi yapılması veya üçüncü harmoniği elimine edecek süzgeç yerleştirilmesidir. Güç sistemindeki üç fazlı kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenlerin genlikleri (filtreleme öncesi ve sonrası) değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Güç sisteminde harmonik bileşenler (filtreleme öncesi ve sonrası)

Harmonik bileşenler	Harmonik bileşenlerin genliği (Süzgeçleme öncesi) (A)	Harmonik bileşenlerin genliği (Süzgeçleme sonrası) (A)
h1	130.3	93.21
h5	13.64	2.005
h7	6.307	1.157
h11	4.949	0.4829
h13	3.039	0.2607
h17	2.571	1.456
h19	1.66	1.05
h23	1.426	0.9398
h25	0.9188	0.6944
h29	0.7971	0.5895
h31	0.4823	0.4517
h35	0.4811	0.3618
h37	0.2373	0.2872
h41	0.3555	0.215
h43	0.1522	0.176
h47	0.2913	0.1244
h49	0.1473	0.103

Harmoniklerin enerji sistemindeki teknik ve ekonomik olumsuzluklarının giderilmesi bakımından birtakım önlemlerin alınması gerekir. Enerji sisteminin tasarımından sonraki safhada harmonik bozulmanın istenen sınır değerlerin altına düşürülmesinde için harmonik filtre devrelerinin kullanılması gerekmektedir. Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenlerin genlikleri (filtreleme öncesi ve sonrası) Şekil 9'da verildiği gibidir.



Şekil 9. Kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri

Güç sistemdeki harmonik bileşenler ek ısı kayıplarına neden olmaktadır. Bu ek kayıp enerji maliyetini artırmaktadır. Ayrıca sistem üzerindeki temel harmonik dışındaki harmonik bileşenler ek gerilim düşümleri oluşturmaktadır. Elektrik tesisleride ağırlıklı olarak ofis akipmanları, kesintisiz güç kaynakları ile gaz deşajlı lambalar üçüncü harmonik bileşen üretirler. Mümkün mertebe bu cihazların üç fazlı seçilmelidir. Üç ve üçün katı harmonikler üç fazlı konvertörlerde sıfırdır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Güç elektroniği elemanları ve çeşitli doğrusal olmayan elemanların her geçen gün artış göstermesi enerji sisteminde dolaşan non-sinüsoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım yada gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde harmonik distorsiyon sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Harmonikler güç sistemlerindeki kirliliktir. Statik dönüştürücülerin kullanımının artması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır.

Pasif süzgeçler kaynak ile yük arasında bağlanırlar. Temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri yok ederler. Seri bağlı kondansatör ve endüktansın bileşiminden oluşurlar. Bazı durumlarda omik direnç elemanı da bağlanabilir. Güç sisteminde harmonik bileşenlerini süzgeçlemek için 2 adet tek ayarlı süzgeç, 1 adet çift ayarlı süzgeç ve 1 adet ikinci dereceden sönümlü süzgeç kullanılmıştır.

Güç sisteminde filtre kullanmadan önce güç faktörü 0.6877 ve toplam harmonik distorsiyonu %12.71 olarak ölçülmüştür. Güç sisteminde pasif filtreler kullanılması ile güç faktörü 0.99 ve toplam harmonik distorsiyonu ise %3.591 olarak gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dastfan, A., Yassami H. and Rafiei M. R., Optimum Design of Passive Harmonic Filter by Using Game Theory Concepts. Intelligent Systems in Electrical Engineering, Vol. 4, No. 4. 2014.
- [2] Çolak, İ., Bayindir, R. and Kabalci, E., A Modified Harmonic Mitigation Analysis Using Third Harmonic Injection PWM in a Multilevel Inverter Control, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference Ohrid, Macedonia, 2010.
- [3] Germeç, K. E., Erdem H., Time-harmonic analysis in electric power systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 263-271, 2015.
- [4] Bayindir, R. Sağıroğlu, Ş. Çolak, İ. Alper Ö., Investigating Industrial Risks Based on Information Security for Observerable Electrical Energy Distribution System and Suggestions. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24(34)(715-723). 2009.
- [5] Rashid, H.M., Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications, Perason Press, 2014.

- [6] Adak, S., Cangi, H., Analysis and Simulation Total Harmonic Distortion of Output Voltage Three Level Diode Clamped Inverter in Photovoltaic System, Bitlis Eren University, Fen Bilimleri Dergisi, ISSN 2147-3129,2015.
- [7] Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R. ve Arıkan, O., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul 2003.
- [8] Bhende,CN. Kalam,A. Malla,SG., Mitigation of Power Quality Problems in Grid-Interactive Distributed Generation System, DE Gruyter:International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 17, pp. 165-172, April 2016.
- [9] Ozdemir, A. Ferikoglu, A., Low cost mixed-signal microcontroller based power measurement technique - IEE Proceedings-Science Measurement And Technology - Vol.151 - pp.253-258 - ISSN : 1350-2344 - DOI : 10.1049/ip-smt:20040242 - JUL - - Article - - 2004 - WOS:000222969400004.
- [10]Yilmaz, A. S., Alkan, A. and H. Asyali, M., Applications of parametric spectral estimation methods on detection of power system harmonics, Electric Power Systems Research, 78, Issue 4, , pp 683-693, April 2008.
- [11] Rüstemli, S., Okuducu, E., Efe, S.B., Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Pasif Filtre Kullanılarak Azaltılması ve Simülasyonu, EVK2015: 6. 2015, Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu, pp120-124, 4-6 Haziran, Sakarya.
- [12]Memon, Z. A., Uquaili, M. A. and Unar, M. A., Harmonics mitigation of industrial power system using passive filters.Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 355-360, 2012.
- [13] Hideaki, F., Hirohmi, A., A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-Series Connection of Passive and Active Filters, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 21, No. 6, 1991.
- [14]Ayan, K. Arifoğlu, U., Optimizing reactive power flow of HVDC systems using genetic algorithm - International Journal of Electrical Power & Energy Systems - Vol.55 - pp.1-12 - ISSN : 0142-0615 - DOI : 10.1016/j.ijepes.2013.
- [15]Anooja C. L. and Leena N., Passive Filter for Harmonic Mitigation of Power Diode Rectifier and SCR Rectifier Fed Loads. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 4, No. 6, 2013.
- [16]Adak,S., Mitigation Harmonic with LCL Passive Filter in off-Grid PV SystemJournal of Engineering and Tecnology, 2;1, pp. 9-20, 2018.
- [17] Sekkeli, M., Tarkan N., Development of a novel method for optimal use of a newly designed reactive power control relay. International Journal of Electrical Power and Energy Systems 2013; 44:736-742.
- [18] Srivastava, K. K., Shakil S. and Pandey A. V., Harmonics & Its Mitigation Technique by Passive Shunt Filter. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN, pp. 2231-2307, 2013.
- [19]Çetin, S., Veri Merkezi Uygulamaları için Yüksek Verimli Bir LLC Rezonanslı DC-DC Dönüştürücü Tasarımı, GU J Sci, Part C, 5(1): 45-54, 2017.
- [20] Özçira, S., Aktif Güç Filtre Tipinin Kompanze Edilmesi Gereken Büyüklüğe Göre Belirlenmesi GU J Sci, Part C, 6(3): 691-704, 2018.



Lojik Devre Laboratuvarları için Entegre Test Devresi Tasarımı

Salim ÇINAR^{1,*}

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Merkez/NİĞDE

Öz

Lojik devre laboratuvarı Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü için önemli laboratuvarlardan bir tanesidir. Entegreler deneyler sırasında doğru bir şekilde çalışmalıdır. Entegre devrelerin düzgün çalışıp çalışmadığını test etmek için bir devre kurmak zor ve zaman alıcıdır. Bu çalışmada, entegre test cihazı entegre devrelerin hızlı ve doğru bir şekilde test edilmesi için tasarlanmıştır. Entegre test cihazında, Microchip tarafından üretilen PIC18F452 mikrodenetleyicisi kontrol ve test algoritmalarının gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır. PIC18F452 düşük güç tüketimine, yüksek performansa ve geliştirilmiş FLASH/EEPROM teknolojisine sahiptir. Entegre test cihazını kullanmak kolay ve basittir. Entegreleri zif-sokete takmak yeterlidir. Test devresi, entegrelerin düzgün çalışıp çalışmadığını LCD ekranda göstermektedir. Entegre test cihazının prototipi üretilerek Lojik devre laboratuvarında kullanılmıştır. Laboratuvar personelinin deneme ve yorumları, entegre test devresinin laboratuvarlarda güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 30/07/2018
Düzeltilme: 04/11/2018
Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Tasarım
Entegre test devresi
Mikrodenetleyici
PIC18F452

Keywords

Design
Integrated circuits tester
Microcontroller
PIC18F452

Integrated Circuits Tester Design for Logic Circuit Laboratories

Abstract

Logic circuit laboratory is one of the important laboratories for Electrical-Electronics Engineering department. The Integrated Circuits (ICs) must work correctly during the experiments. It is difficult and time-consuming to set up a circuit to test whether the ICs are working correctly or not. In this work, the ICs tester was designed to test the ICs quickly and correctly. In the ICs tester, the PIC18F452 microcontroller produced by Microchip was used to perform the control and test algorithms. The PIC18F452 has low power consumption, high performance and improved FLASH/EEPROM technology. Using ICs tester is easy and simple. It is enough to just insert ICs into the zif-socket. The tester shows on the LCD screen whether the ICs are working correctly or not. The prototype of the ICs tester was produced and used in the logic circuit laboratory. Experiments and comments from laboratory personnel show that the ICs tester can be used safely in laboratories.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik eğitimi teori ve pratik uygulamaların yoğun bir şekilde harmanlandığı zorlu bir süreçtir. İyi bir mühendis analitik düşünme ve problemi eldeki imkânları kullanarak optimum şekilde çözme becerisine sahip olmalıdır [1]. Bu problemler ihtiyaç duyulan yeni bir ürün veya mevcut sistemin değişen koşullara göre yeniden tasarlanması veya iyileştirmesi olabilir. Problemlerin çözümü için en büyük araç bilgidir. Günümüz teknolojisi sayesinde bilginin elde edilmesi kolaylaşmıştır. Fakat bu bilgi yoğunluğunun yanlış kullanılması problemlerin çözümünden çok olayların karmaşıklaşmasına sebep olabilmektedir. Mühendislik eğitiminde bilginin elde edilmesi, güvenilirliğinin test edilmesi, hangi bilginin nerede ve nasıl kullanılacağı öğretilmektedir [2].

Teorik olarak öğrenilen bilgilerin gerçek problemlerde uygulanması oldukça önemlidir. Bunun için mühendislikte laboratuvar, deney ve saha çalışmalarının titizlikle yapılması gereklidir [3], [4]. Mühendisliğin bir bölümü olan Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde (EEM) öğrenciler temel ve seçmeli laboratuvar derslerini almaktadırlar. Ölçme, lojik, devre teorisi ve elektronik laboratuvarları temel laboratuvarlara örnek olarak verilebilir. Bu isimler üniversitelere göre değişiklik gösterebilir ve tüm

*İletişim yazarı, e-mail: scinar@ohu.edu.tr

öğrencilerin alması zorunludur. Laboratuvar ve saha çalışmalarında kullanılacak malzemelerin ve cihazların standartlara uygunluğu yapılan deneylerin başarısını etkilemektedir. Deneylerden önce malzeme ve cihazların kontrol edilerek öğrencilere verilmesi deneylerden doğru sonuç alınmasını sağlamaktadır. Temel laboratuvarlarda öğrencilerin malzemeleri tanınması ve bağlantıların nasıl gerçekleştirileceğinin öğrenilmesi için genelde ayrıık elemanlar kullanılmaktadır. Örneğin transistör, direnç, kapasitör veya lojik entegreler deney çalışmasına göre verilmektedir. Öğrenci sayısının fazla olduğu durumlarda bu malzemelerin deneylerin öncesinde ve sonrasında sağlamlık kontrolü önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle lojik devre laboratuvarında kullanılan entegrelerin sağlamlık testi zaman alan bir işlemdir. Lojik entegrelerin bacak sayısı fazladır. Temel lojik fonksiyonları yerine getiren entegreler 14 veya 16 bacaklı olabilmektedir. Lojik entegrelerin sağlamlık testi için gerekli giriş-çıkış bağlantıları yapılmalı ve ölçülen değerlerin doğruluk tablosuna göre uygunluğu kontrol edilmelidir. Bu işlemlerin el ile deney seti üzerinde yapılması zaman kaybına ve iş yükünün artmasına sebep olmaktadır. Test işlemin yapan bir devre düzeneğinin olması kontrollerin düzgün ve hızlı yapılmasına imkân sağlayacaktır.

Yapılan bu çalışmada lojik devre laboratuvarlarında kullanılmak üzere mikrodenetleyici tabanlı [5] entegre test devresi tasarlanmıştır. Devre üzerindeki zif-sokete takılan entegre mikrodenetleyici vasıtasıyla test edilir. Eğer entegre sağlam ise LCD ekran üzerinde entegrenin ismi gösterilmektedir. Çalışma belirtilen kısımlardan oluşmaktadır. Giriş bölümünde çalışmanın amacı ve gerekliliği belirtilmiştir. İkinci bölümde kullanılan yöntemler ve tasarımlardan (donanım ve yazılım) bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise tasarlanan devrenin gerçek zamanlı uygulamasına yer verilmiştir. Sonuç kısmında ise elde edilen denemelerin yorumları verilmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEMLER (MATERIALS and METHODS)

Bu bölümde çalışmada kullanılan donanım, yazılım ve tasarım aşamalarından bahsedilmiştir. Entegre test devresi iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım entegrelerin test edileceği donanım yapısıdır. İkinci kısım ise bu donanımı çalıştıracak yazılımın oluşturulmasıdır.

2.1 Entegre test devresi donanım tasarımı

Sayısal fonksiyonların gerçekleştirilmesi için lojik kapılar ve lojik elemanlar sıklıkla kullanılmaktadır. Lojik entegreler genelde plastik veya epoksi kılıflarla kaplanarak son kullanıcıya ulaşmaktadır. Lojik kapı içiren örnek bir entegrenin şematik gösterimi ve doğruluk tablosu Şekil 1'de verilmiştir. Entegre incelendiğinde A ve B gösterimi girişleri, C ise çıkışı ifade etmektedir. VCC besleme gerilimini, GND toprak hattı bağlantısını göstermektedir. Lojik fonksiyonlar incelenirken ikilik sayı sistemi kullanılır. İkilik sayı sisteminde "0" ve "1" olmak üzere iki değer vardır. Lojik elemanlarda "lojik 0" fiziksel olarak ilgili bağlantıda (giriş veya çıkış) akım veya gerilimin olmadığını, "lojik 1" ise ilgili bağlantıda akım veya gerilimin var olduğunu göstermektedir. Şekil 1'de verilen AND (VE) kapısı iki girişe bir çıkışa sahiptir ve entegre içinde bu yapıdan 4 adet mevcuttur. AND kapısı her iki girişin lojik 1 olduğu durumda çıkışında lojik 1 değeri göstermektedir. Diğer durumlarda ise çıkış lojik 0 olmaktadır. AND kapı entegresinin doğruluğunu kontrol etmek için ilk olarak uygun besleme gerilimi uygulanmalıdır. Daha sonra A ve B pinlerine giriş değerleri verilerek C pininden çıkış değeri okunmalıdır. Verilen girişlere karşılık okunan çıkışlar doğruluk tablosunu sağlıyorsa ilgili entegrenin sağlam olduğu kanısına varılır.

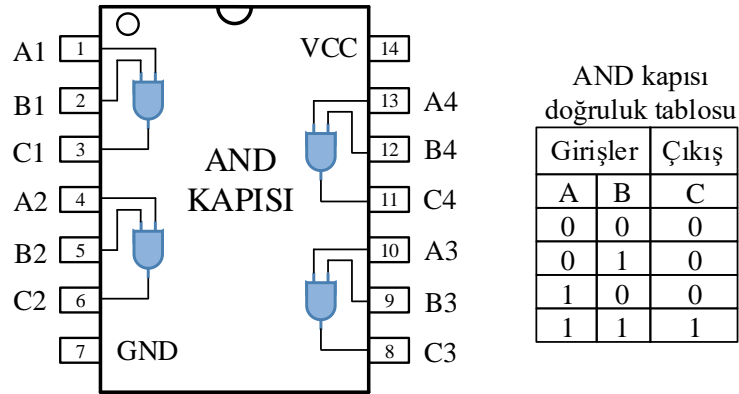
Diğer lojik entegreler incelendiğinde giriş/çıkış, VCC ve GND pinlerinin yerleri farklı olabilmektedir. Doğruluk tablosunun sağlanması için belirtilen pinlerin uygun şekilde bağlanması gerekmektedir. Bu işlemlerin elde yapılması zor ve zaman alan bir süreçtir.

Yapılan çalışmada entegrelerin giriş/çıkış bağlantılarının gerçekleştirilmesi ve hızlı bir şekilde doğruluk tablosunun kontrol edilmesi için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikroişlemciler temel olarak Merkezi İşlem Birimi (CPU), Veri-Kontrol-Adres Yolları (BUS) ve Giriş/Çıkış Pinlerinden oluşmaktadır. Mikroişlemciler genellikle bilgisayar sistemlerinde kullanılmaktadır. Mikrodenetleyiciler endüstride sıklıkla kullanılan gömülü sistem elemanlarıdır. Mikroişlemcilerden farkı içerisinde dâhili Rastgele Erişimli Bellek (RAM), Sadece Okunabilen Bellek (ROM), Giriş/Çıkış Pinleri, Analog/Sayısal dönüştürücü, Seri/Paralel haberleşme portları, Zamanlayıcı (Timer) gibi birçok birimi içerisinde barındırmasıdır. Ayrıca mikrodenetleyiciler Program Hafızası (On-Chip Program Memory) sayesinde

defalarca programlanabilir [6]. Mikrodenetleyiciler, tıp elektroniği [7], [8], güç elektroniği [9] ve yenilenebilir enerji alanlarında [10] sıklıkla kullanılmaktadır.

Günümüzde mikrodenetleyici üreten birçok firma mevcuttur (Microchip, Texas Instruments, Renesas, Atmel, v.b.). Üreticiler genel amaçlı, uygulamaya yönelik (Otomotiv, medikal cihaz veya motor sürücü devreleri) veya özel amaçlı (Sinyal işleme, ARM mimarisi kullanılan) mikrodenetleyicileri piyasaya sürmektedirler. Kullanıcı çözmek istediği probleme göre mikrodenetleyici özelliklerini göz önünde bulundurarak seçim yapılmalıdır.

Entegre test devresinde Microchip firmasına ait PIC18F452 isimli mikrodenetleyici kullanılmıştır [11]. PIC18F452 32Kbyte program hafızasına, 1,5Kbyte data hafızasına sahiptir. Faz kilitli döngü (PLL) kullanılarak 40MHz çalışma saat frekansına çıkabilmektedir. 33 adet Giriş/Çıkış pinine, 10-bit Analog/Sayısal çeviriciye, 4 adet zamanlayıcıya (Timer) ve kullanıcının çevre birimleri ile haberleşmesini sağlayan donanımlara sahiptir. Birim fiyatının uygun olması, kolay ulaşılabilir olması, teknik destek ve uygulama alanlarının geniş olması ve diğer özelliklerinden dolayı belirtilen mikrodenetleyici çalışmada tercih edilmiştir.

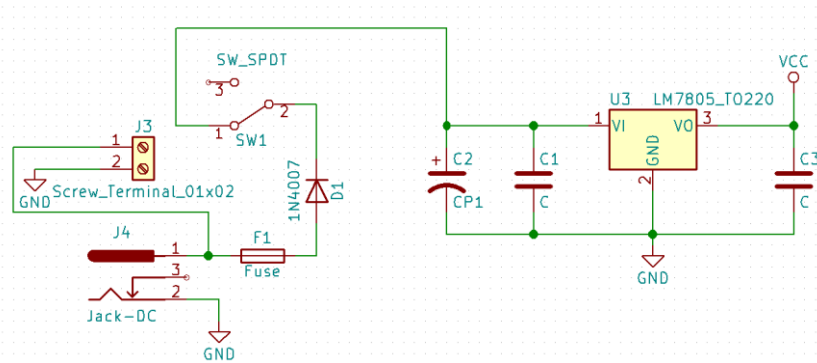


Şekil 1. Lojik AND kapısının şematik gösterimi ve doğruluk tablosu

Entegre test devresinin şematik gösterimi ve baskı devre çizimi için KiCad yazılımı kullanılmıştır [12]. KiCad açık kaynak kodlu, internet üzerinden herkesin ulaşabileceği ve geniş kütüphanelere sahip profesyonel bir yazılımdır. Entegre test devresinin donanım bölümleri;

- ✓ Güç katı
- ✓ Kontrol kısmı (PIC18F452)
- ✓ Gerilim ve toprak hattı yönlendirmesi
- ✓ Gösterge paneli

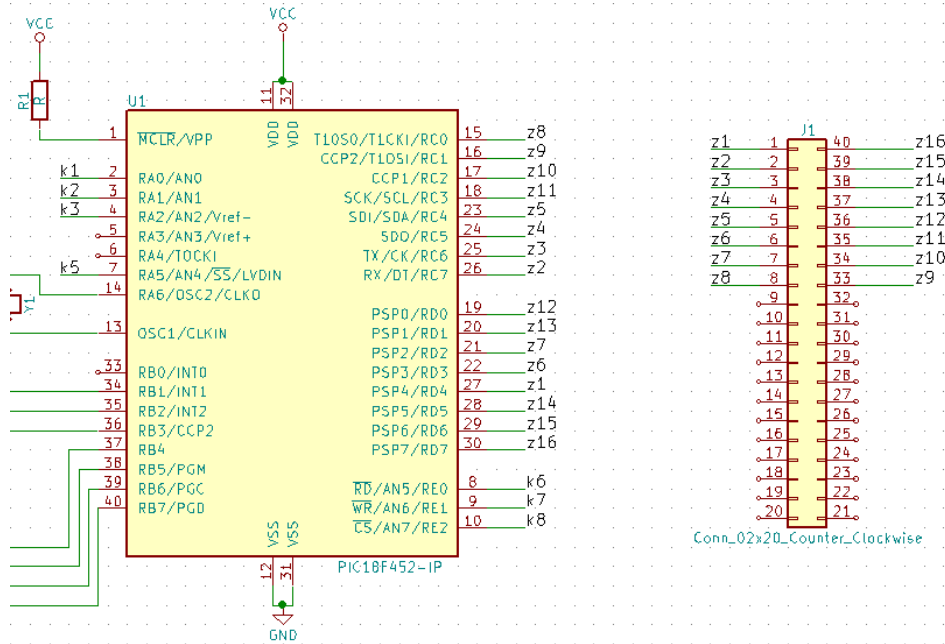
Güç katı; Mikrodenetleyici, entegreler ve göstergenin çalışması için gerekli besleme gerilimini sağlamaktadır. Şekil 2'de devrenin güç katı görülmektedir.



Şekil 2. Entegre test devresinin güç katı

J3 ve J4 girişlerinden birine 9V veya 12V DC gerilim uygulanmaktadır. J3 iki girişli baskı devre tipi klemensdir. J4 ise adaptörler için JACK bağlantısıdır. İki giriş yapılmasının sebebi adaptörün olmadığı durumlarda J3 girişine kablo yardımıyla harici bir kaynaktan giriş yapılabilmesidir. F1 sigortası devreyi aşırı akımlardan korumak için konulmuştur (0,5A). D1 diyotu J3 ve J4 girişlerine bağlanan DC gerilimin ters bağlanması durumunda oluşacak hasarlardan devreyi korumaktadır. 7805 elamanı PIC18F452, entegre ve gösterge paneli için gerekli DC 5V seviyesini elde etmek kullanılmıştır.

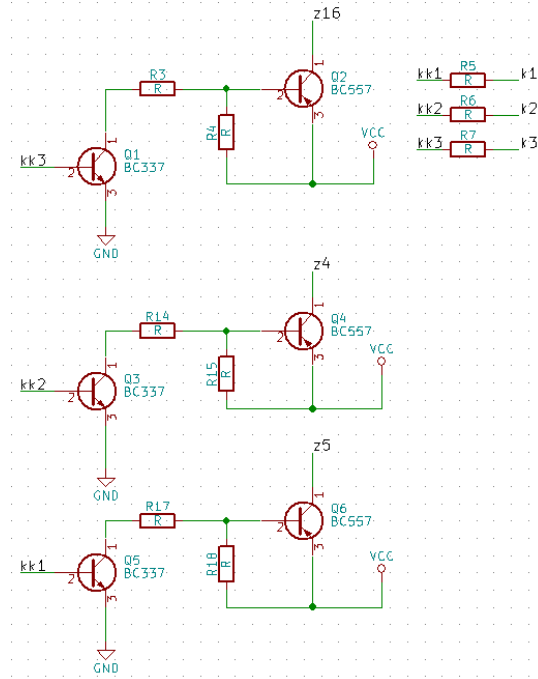
Kontrol kısmı; PIC18F452 mikrodenetleyicisinin entegre ile olan bağlantısı Şekil 3'te gösterilmiştir. Entegrelerin kolay bir şekilde devreye takılıp sökülmesi için 40 pin zif-socket kullanılmıştır (J1).



Şekil 3. Entegre test devresinin kontrol kısmı

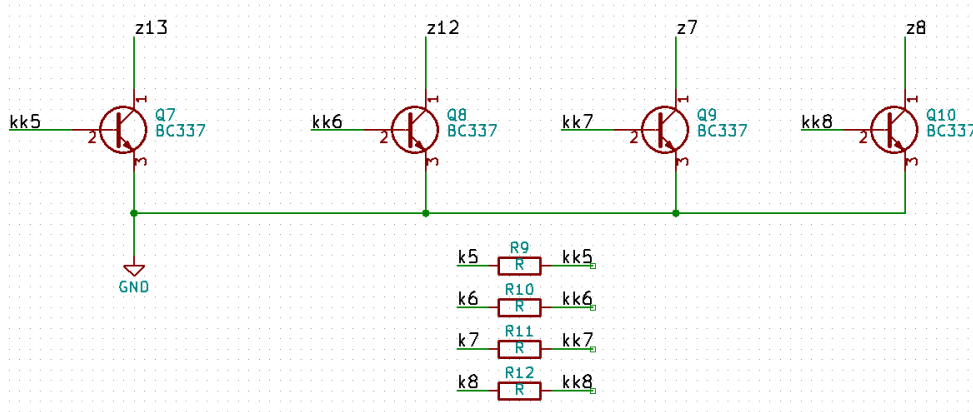
Test devresi maksimum 16 pinli entegreleri test etmek için tasarlanmıştır. Entegrenin tüm pinlerine karşılık mikrodenetleyicinin C ve D portları bağlanmıştır. C ve D portları yazılan programa göre giriş/çıkış olarak ayarlanabilmektedir. Farklı entegrelerin farklı giriş/çıkış kombinasyonlarına göre C ve D portlarının yazılan kod çerçevesinde esnek bir şekilde değiştirilmesi devrenin avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Gerilim ve toprak hattı yönlendirmesi; Entegreler aktif elemanlar olduğu için besleme gerilimi uygulanmalıdır. Şekil 1'deki AND kapısı incelendiğinde 7 ve 14 numaralı pinler sırasıyla GND(toprak) ve VCC'dir (DC 5V). Pratik olarak düşünüldüğünde mikrodenetleyicinin D7 pini çıkış olarak ayarlanır ve değeri lojik 1 yapılır (VCC=5V). D2 pini ise giriş olarak ayarlanarak entegrenin toprağı bağlanmış olur. Fakat mikrodenetleyicinin her bir pininin çekebileceği ve sağlayabileceği akım değeri vardır (sink/source). Bu değerlerden fazla akım uygulandığında mikrodenetleyici arızalanabilir. Bunun için 7805 çıkışından alınan 5V entegreye ulaştırılmalıdır. Bir diğer problem ise farklı entegrelerin VCC ve GND pinlerinin yerleri değişik olabilir. 74LS73 entegresinin 4 numaralı pini VCC 11 numaralı pini ise GND'dir. Görüldüğü gibi giriş/çıkış, VCC ve GND pinlerinin değişik entegre tipleri için ayarlanması gerekir. VCC ve GND değerlerinin ilgili pine doğrudan bağlanması yerine transistörler kullanılarak kontrollü bir şekilde verilmesi sağlanabilir. Şekil 4'te VCC bağlantısının transistörler vasıtası ile ilgili entegreye aktarılması gösterilmiştir. Örneğin 4 numaralı pini VCC olan bir entegrede Q1 ve Q5 transistörlerinin girişine mikrodenetleyici tarafından lojik 0 uygulanırsa transistörler kesime gider. Transistörler kesime gidince z5 ve z16 bağlantılarına VCC gerilimi geçemez. Bu pinler entegre için giriş/çıkış olarak ayarlanabilir. Q3 numaralı transistöre lojik 1 uygulandığında ise Q3 ve Q4 iletme geçer. İletime geçen Q4 transistörü üzerinden VCC 4 numaralı pine aktarılır.



Şekil 4. Farklı pin dizilimine sahip entegrelerin VCC bağlantıları

Benzer şekilde GND bağlantıları transistörler vasıtasıyla yapılabilir. Şekilde 5'te ise farklı entegrelerin farklı yerlerindeki GND pinlerine transistörler aracılığı ile yapılan bağlantı gösterilmiştir.

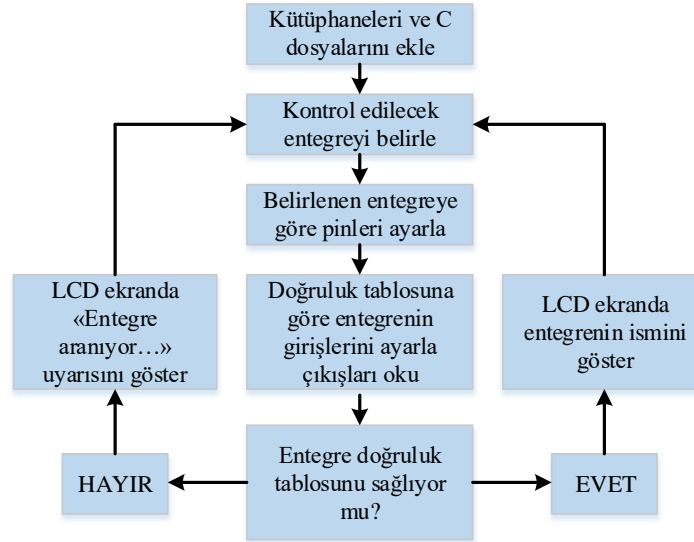


Şekil 5. Farklı pin dizilimine sahip entegrelerin GND bağlantıları

Örneğin 11 numaralı pini GND olan bir entegrede Q8, Q9, Q10 transistörlerinin girişleri lojik 0, Q7 transistörünün girişi lojik 1 yapılır. Q7 iletime geçtiği için test edilecek entegre içindeki akımlar transistör üzerinden geçerek toprak hattına ulaşır.

Gösterge paneli; Bu kısımda kullanıcıya bilgi verilmektedir. Gösterge olarak 2x16 alfa-nümerik S1v1 Kristal Gösterge (LCD) kullanılmıştır. Şekil 6'da mikrodenetleyici ve LCD arasındaki bağlantı gösterilmiştir.

mikrodenetleyiciler ve dijital sinyal denetleyicileri için uygulamalar geliştirmek üzere bilgisayar üzerinde çalışan bir yazılımdır. Entegre Geliştirme Ortamı (IDE) mikrodenetleyicilerde kullanılacak kodları geliştirmek için gerekli bir ortam olarak düşünülebilir. IDE ortamında kod yazılabilir, yazılan kodların hata ayıklaması (Debug) yapılabilir. Yazılan kod IDE ortamında derlenerek mikrodenetleyiciye yüklenecek HEX dosyası oluşturulabilir. Ayrıca oluşturulan HEX dosyası uygun bir programlayıcı yardımıyla IDE yazılımı üzerinden mikrodenetleyiciye yüklenebilir. IDE ortamında Assembly dili veya C dili ile kod yazılabilir. PIC18F452 mikrodenetleyicisi C derleyicisine göre optimize edilmiş mimari/komut setine sahiptir. Bu yüzden kodlama için C dili tercih edilmiştir. C ile yazılan kodun derlenmesi için Microchip firmasına ait “XC8” derleyicisi kullanılmıştır. Şekil 8’de programın akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 8. Mikrodenetleyici için yazılan programın akış şeması.

Yazılan kod sürekli bir döngü içerisinde çalışmaktadır. İlk olarak gerekli kütüphaneler ve C dosyaları programa dâhil edilir. Mikrodenetleyicinin çalışması için gerekli konfigürasyon ayarları yapılır. Ayarlamalar bittikten sonra test işlemine geçilir. Test edilecek entegreler önceden belirlenmiştir. Yapılan çalışmada Lojik devre laboratuvarlarında sıklıkla kullanılan entegreler seçilmiştir. Tablo 1’de tasarlanan devrenin test edebileceği entegreler verilmiştir. Bu sayı ihtiyaca göre artırılabilir. Test edilecek entegre zif-sokete takılır. Takılan entegre ile Tablo 1’deki entegreler sırasıyla tek tek karşılaştırılır. Örnek bir karşılaştırma işlemi aşağıda verilmiştir.

1. Tablo 1.’deki ilk entegre seçilir. Burada 74LS00 verilmiştir. (Sıralama istenirse değişebilir)
2. Entegrenin VCC ve GND pinleri aktif hale getirilir. Entegrenin giriş/çıkış pin konfigürasyonuna göre PIC18F452 mikrodenetleyicisinin pinleri ayarlanır.
3. Seçilen entegrenin doğruluk tablosundaki girişlerine karşılık çıkışları incelenir.
4. Eğer doğruluk tablosunun tamamı sağlanmamışsa LCD ekranına “Entegre aranıyor...” yazdır. Eğer doğruluk tablosunun tamamı sağlanmışsa LCD ekranına entegrenin ismini yazdır (Örneğin “74LS00 NAND”). Tablo 1’de verilen bir sonraki entegreyi seç. Adım 2’ye tekrardan git.

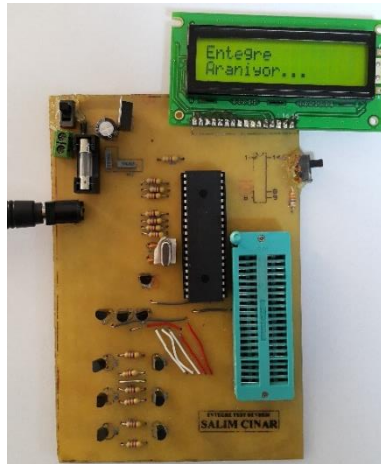
Test etme işlemi enerji olduğu sürece devam etmektedir.

Tablo 1. Test devresinin test edebildiği entegreler.

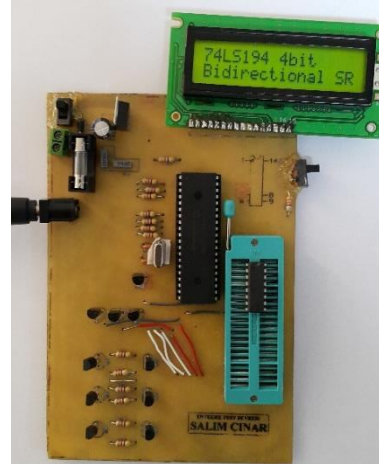
14 Bacaklılar (gnd:7, vcc=14)	16 Bacaklılar (gnd:8, vcc:16)
1) 74LS00 (NAND)	15) 74LS138 (3x8 Decoder)
2) 74LS02 (NOR)	16) 74LS139 (2x8 Decoder)
3) 74LS04 (NOT)	17) 74LS148 (8x3 Encoder)
4) 74LS08 (AND)	18) 74LS151 (1x8 Mux)
5) 74LS32 (OR)	19) 74LS153 (1x4 Mux)
6) 74LS86 (EXOR)	20) 74LS155 (2x4 Decoder)
7) 74LS74 (D flip flop)	21) 74LS157 (4 bit 2x1 Mux)
8) 74LS164 (8 bit shift register)	22) 74LS165 (8 bit PISO SR)
9) 74LS20 (4 input nand)	23) 74LS174 (D flip flop with clear)
10) 74LS21 (4 input and)	24) 74LS194 (4 bit Bidirectional SR)
11) 4077 (EXNOR)	25) 74LS83 (gnd:12, vcc:5) (4 bit Binary adder)
12) 74LS73 (gnd:11, vcc:4)(JK FF)	26) 74LS75 (gnd:12, vcc:5) (Quad latch)
13) 74LS90 (gnd:10, vcc:5) (Binary counter)	27) 74LS76 (gnd:13, vcc:5) (JK FF)
14) 74LS93 (gnd:10, vcc:5) (4 bit Binary counter)	28) 74LS283 (4 bit Binary FA)
	29) CD4011 (NAND)

3. GERÇEK ZAMANLI DENEMELER (REAL TIME TRIALS)

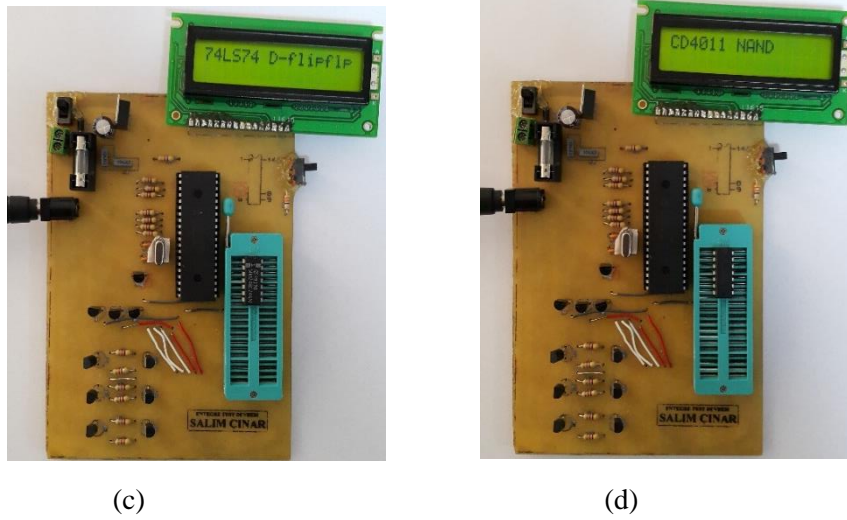
Tasarlanan entegre test devresinin prototipi ürün haline getirilip denenmiştir. Devre eğitim öğretim döneminde Lojik devre laboratuvarında kullanılmıştır. Şekil 9'da ürün haline getirilen test devresinin çeşitli uygulamaları görülmektedir.



(a)



(b)



Şekil 9. Entegre test devresinin gerçek zamanlı çalışması. (a) Entegre olmadığı veya bozuk olduğu durum. (b)(c)(d) Sağlam entegrenin LCD ekranında gösterilmiş durumu.

Yapılan denemelerde test devresinin sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Devre entegreleri çok hızlı bir şekilde kontrol edebilmektedir. Laboratuvarında görevli kişilerin test işlemi için harcayacağı zaman büyük ölçüde düşmektedir. Bazı entegrelerde aynı lojik yapı birden fazla olabilir. Şekil 1’de gösterildiği gibi bir entegrede 4 adet AND kapısı mevcuttur. Fiziki olarak bu kapılardan bir tanesi veya birkaç tanesi arızalı olup geri kalanı çalışabilir. Test devresi bu kapıların hepsini tek tek kontrol etmektedir. Test devresi arızalı veya sağlam olarak sınıflama yapıp LCD ekranda gösterebilir. Düşünce olarak sağlam kapı elemanları kullanılabilir. Fakat entegrelerin işaretlenmesi ve bir sonraki deneylerde kullanılması sırasında bu durumun dikkate alınması gerekmektedir. Pratik olarak bunun yapılması zordur ve kullanıcının hata yapma ihtimali artmaktadır. Bu nedenle entegrenin içinde bulunan lojik yapıların hepsinin sağlam olması gerekmektedir. Test devresinin yazılımı belirtilen koşullara göre yapılmıştır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Mühendislik eğitiminde laboratuvarlar önemli bir yer tutmaktadır. Laboratuvarlarda kullanılacak malzemelerin sağlamlığının deneylerin öncesinde ve sonrasında kontrol edilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde bulunan Lojik devre laboratuvarı için entegre test devresi tasarlanmıştır. Test devresinin kullanımı kolay olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Devre tak-çalıştır özelliğine sahiptir. Kullanıcının harici olarak bir ayar yapmasına gerek yoktur. Devreye enerji verildikten sonra test edilecek entegre zif-sokete yerleştirilir. PIC18F452 mikrodenetleyicisi kontrol işlemi başlatır. Eğer entegre içindeki lojik yapılar doğruluk tablosunu sağlıyorsa LCD ekrana entegrenin adı yazdırılır. Tasarlanan devrenin avantajları şu şekilde sıralanabilir. Entegreler hızlı ve doğru test edilebilmektedir. Böylelikle zamandan tasarruf yapılmaktadır. Üzeri silinmiş veya okunmayan entegreler test cihazı sayesinde belirlenebilir. Entegre test devresi bu hali ile mevcut ihtiyaçları karşılamakta ve sorunsuz çalışmaktadır. Devre tasarımı gelişime açıktır. İleriki dönem çalışmalarında daha kapsamlı ve akıllı tasarımların yapılması planlanmaktadır. Örneğin hafıza birimi konularında daha fazla entegrenin test edilmesi sağlanabilir. Bilgisayar destekli bir yapı oluşturulabilir. Bilgisayar için tasarlanan bir arayüz ile farklı entegre tipleri için test döngüsü yapılabilir. Yapılan çalışma ile tasarlanan devrenin Lojik devre laboratuvarları için faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Akgül, M. K. Uçar, M. M. Öztürk, ve Z. Ekşi, “Mühendislik Eğitiminin İyileştirilmesine Yönelik Öneriler, Geleceğin Mühendisleri ve İşgücü Analizi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, c. 17, sy 1, 2013.
- [2] E. Can, “Laboratuvar Çalışmalarının Bilgisayar Mühendisliği Eğitimindeki Yeri ve Önemi”, *Elektr. MÜHENDİSLİĞİ*, sy 430, ss. 94-96, 2007.
- [3] C. S. Lee, J. H. Su, K. E. Lin, J. H. Chang, ve G. H. Lin, “A Project-Based Laboratory for Learning Embedded System Design With Industry Support”, *IEEE Trans. Educ.*, c. 53, sy 2, ss. 173-181, May. 2010.
- [4] L. A. Ajao, J. Agajo, J. G. Kolo, M. A. Adegboye, ve Y. Yusuf, “Learning of Embedded System Design, Simulation and Implementation: A Technical Approach”, *Am. J. Embed. Syst. Appl.*, c. 3, sy 3, s. 35, May. 2016.
- [5] M. Özcan ve H. Günay, “Mikrodenetleyici geliştirme seti tasarım ve uygulamaları”, *Design and applications development kit microcontroller*, 2009.
- [6] B. Korol, “PIC Mikrodenetleyiciler ve Program Geliştirme Kartı Uygulaması”, *Sak. Univ. J. Sci.*, c. 7, sy 3, ss. 179-184, Eyl. 2003.
- [7] M. E. Aktan, İ. Göker, E. Akdoğan, ve B. Öztürk, “Design, implementation and performance analysis of a microcontroller based wireless electromyography device”, içinde *2017 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, 2017, ss. 1-4.
- [8] S. C. Yener ve R. Mutlu, “A microcontroller-based ECG signal generator design utilizing microcontroller PWM output and experimental ECG data”, içinde *2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT)*, 2018, ss. 1-4.
- [9] R. Bayindir, I. Colak, E. Kabalci, ve A. Gorgun, “PID controlled synchronous motor for power factor correction”, içinde *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2009, ss. 408-412.
- [10] M. Demirtas, I. Sefa, E. Irmak, ve I. Colak, “Low-cost and high sensitive microcontroller based data acquisition system for renewable energy sources”, içinde *Automation and Motion 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives*, 2008, ss. 196-199.
- [11] “PIC18F452 - Microcontrollers and Processors - Microcontrollers and Processors”, 23-Tem-2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F452>. [Erişim: 23-Tem-2018].
- [12] “KiCad EDA”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://kicad-pcb.org/>. [Erişim: 25-Tem-2018].
- [13] “MPLAB- X IDE | Microchip Technology”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.microchip.com/mplab/mplab-x-ide>. [Erişim: 26-Tem-2018].



Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzenine Gerçekleşmesi

Ersagun Kürşat YAYLACI^{1,*}, İrfan YAZICI²

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54050, Serdivan/SAKARYA

Öz

Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmasına yönelik mekanik ve elektriksel olarak birçok çalışma yapılmıştır. Mekanik çalışmalar genel olarak rüzgâr türbini ve özel tip makine tasarımlarıdır. Elektriksel çalışmalar ise güç dönüştürücü devreleri, şebeke entegrasyonu ve maksimum güç noktasının takibi konusunda yapılan çalışmalardır. Elektriksel çalışmaların yapılabilmesi için rüzgâr enerji dönüşüm sistemine (REDS) ihtiyaç duyulur. Ancak bir rüzgâr enerji santralinde çalışma imkânı yoksa rüzgâr enerji sisteminin gerçek zamanlı modelinin laboratuvar ortamında oluşturulması gerekmektedir. REDS'ler birçok farklı topolojide olabilmektedir. Genel olarak; rüzgâr türbini/rüzgâr türbini emülatörü, generatör ve güç dönüştürücü birimlerinden oluşmaktadır. Bu konuda literatürde oldukça fazla çalışma yapılmış olmasına rağmen, kurulan gerçek zamanlı sistem modeli hakkında detaylı bilgi elde edilememek çoğunlukla mümkün gözükmemektedir. Bu çalışmada, bu amaç göz önüne alınarak gerçek zamanlı rüzgâr enerji sisteminin deneysel ortamda oluşturulması detaylı olarak ele alınmış ve bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara ışık tutması amaçlanmıştır. Kurulan gerçek zamanlı deney düzeninde maksimum güç çalışması için gerekli olan performans katsayısına ilişkin grafik elde edilmiş ve böylece kurulan deney düzeninin gerçek rüzgâr türbini ile aynı olduğu gösterilmiştir. Bunun yanı sıra sabit bir rüzgâr hızı için tasarlanan kontrol algoritması sisteme uygulanarak sistemin maksimum güç noktasında işletimi sağlanmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 09/10/2018

Düzeltilme: 18/12/2018

Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerji sistemi

Sabit mıknatıslı senkron jeneratör

Maksimum güç noktasının takibi

Keywords

Wind Energy

Wind energy system

Permanent magnet

synchronous generator

Maximum power point tracking

Implementation of a Sample Test System for an Autonomous Wind Energy System

Abstract

Many studies have been made in terms of mechanical and electrical related to using of convert the wind energy into electrical energy. The mechanical studies are generally wind turbine and special type machine designs. The electrical studies are the studies on power converter circuits, grid integration, and maximum power point tracking. A wind energy conversion system (WECS) is required to perform electrical studies. However, if there is no possibility to study in a wind power plant, the real-time model of the wind energy system should be established in the laboratory environment. The WECSs can be in many different topologies. Generally; the WECSs consist of wind turbine/wind turbine emulator, generator and power converter units. Although much work has been done in the literature on this topic, it is not possible to obtain detailed information about the established real-time system model. In this study, considering this aim, the real-time wind energy system is presented in detail and it is aimed to shed light on the researchers working in this field. The graph of the performance coefficient required for maximum power point tracking in the established experimental setup has been obtained and it was shown that the established experimental setup is similar to the real wind energy system. In addition, the system has been operated at maximum power point by applying the designed control algorithm to the system for a constant wind speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Her geçen yıl artış gösteren elektriksel enerji talebi; fosil yakıtların tükenmeye doğru gitmesi ve çevresel olumsuz etkileri nedeniyle, alternatif enerji kaynaklarına yönelimi arttırmaktadır. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olup doğada sonsuz kaynağa sahip ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır [1, 2]. Ayrıca rüzgâr enerjisi, güneş oldukça varlığını sürdürebileceği gerekçesiyle tükenmez bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu sebeple rüzgâr enerjisi üretim kaynakları, gelecek için potansiyel bir alternatif enerji kaynağı olarak görülmektedir [3, 4].

Son yıllarda rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları arasında en iyi büyüme hızına sahip olduğu görülmektedir [5]. 2030 yılına kadar 1000 GW kurulu güç kapasitesi ile yaklaşık 2700 TWh rüzgâr enerjisi üretilebileceği ve bu değer toplam elektrik tüketiminin %9'una karşılık geleceği öngörülmektedir. 2050 yılına dek ise bu oranın %12 seviyelerine geleceği düşünülmektedir [6]. Büyük rüzgâr türbinleri neredeyse teknolojik olgunluğa erişmiş olup küçük ölçekli rüzgâr enerji dönüşüm sistemlerinin (REDS) daha da optimize edilerek verimliliklerinin ve güvenilirliklerinin artırılması gerekmektedir [5].

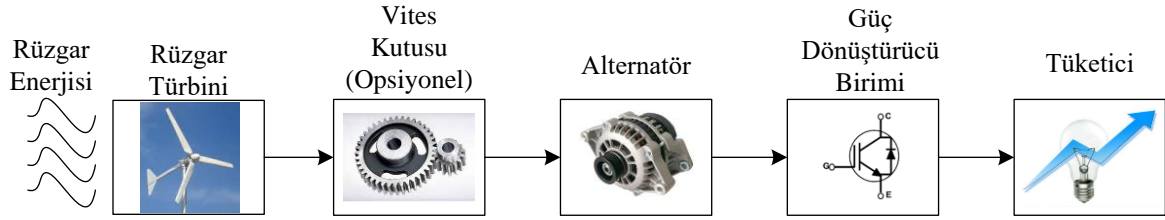
REDS'lerde verimliliğin artırılabilmesi için genel olarak rüzgâr türbin tasarımlarında yapılabilecek geliştirmeler ya da maksimum güç noktasının takibi (MGNT) konusunda yapılabilecek iyileştirmeler öne çıkmaktadır. Kanat tasarımında yapılan çalışmalar, performans ya da güç katsayısının Betz sınırı olarak bilinen maksimum sınırına olabildiğince yaklaşmasını sağlamak amacıyla yapılan çalışmalar olup daha çok kanatların mekanik geometrisi ile ilgilidir. MGNT çalışmaları ise her rüzgâr türbinine ait performans katsayısının, değişen rüzgâr hızına rağmen maksimum değerinin sağlanması amacıyla yapılır ve elektriksel olarak makine devir sayısının ayarlanması prensibine dayanır. Güvenilirlik çalışmaları denildiğinde ise REDS'lerin şebeke entegrasyonu ve güç kalitesine olan etkisi ön plana çıkmaktadır.

Tüm bu çalışmaları yapabilmek amacıyla her ne kadar benzetim programları kullanılabilir olsa dahi gerçek bir sistem modeli üzerinde çalışmak; yapılan çalışmanın gerçeğe daha uygun olduğunu kanıtlayabilmektedir. Literatür çalışmalarında gerçek zamanlı REDS'ler ile alakalı birçok çalışma yapılmıştır [7–11]. Gerçek zamanlı REDS modelleri birçok topolojilere sahip olabilmektedir. Genel olarak; rüzgâr türbini/rüzgâr türbini emülatörü, generatör ve güç dönüştürücü birimlerinden oluşmaktadır. REDS'ler kullanılarak literatürde akademik oldukça fazla deneysel çalışma yapılmış olmasına rağmen, kurulan gerçek zamanlı sistem modeli hakkında detaylı bilgi elde edebilmek çoğunlukla mümkün gözükmemektedir.

Bu çalışmada tüm bu sebepler göz önüne alınarak gerçek zamanlı REDS modelinin deneysel ortamda oluşturulması ele alınmış olup bu alanda çalışma yapacak kişilere ışık tutması amaçlanmıştır. Kurulan sistem modelinde, her bileşenin birbiri ile uyumlu olması gerekmekte ve sistem ancak bu şekilde gerçek modele yakın olabilmektedir. Bu amaçla her birim sırasıyla açıklanmış, benzetim modeli blok diyagramı ile verilmiş ve deneysel düzenek laboratuvar ortamında kurulmuş olan modeli verilerek ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bunun yanısıra bu deneysel düzenek ile MGNT çalışmaları için gerekli olan performans katsayısı grafiği elde edilmiş ve MATLAB/Simulink modelinde elde edilen performans katsayısı grafiği ile karşılaştırılmıştır. Son olarak kontrol algoritması sayısal işlemciye yüklenerek sistemin MGNT çalışması yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur.

2. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ (WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM)

REDS'ler kullanılan topolojiye göre değişiklik gösterebilmesine rağmen genel olarak bir rüzgâr enerji dönüşüm sistemi şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir. Öncelikle aerodinamik rüzgâr enerjisi türbin tarafından kanatları vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu mekanik enerji; türbin şaftına doğrudan ya da vites kutusu üzerinden bağlı olan generatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Güç dönüştürücü birimine aktarılan elektrik enerjisi ile güç dönüştürücü biriminde hem MGNT çalışmaları yapılır hem de şebeke ya da tüketici ölçütlerine uygun hale getirilip kullanıcıya aktarılır.



Şekil 1. Klasik bir rüzgâr enerji dönüşüm sistemi şematik diyagramı (Schematic diagram of a conventional wind energy conversion system)

2.1. Rüzgâr Türbini (Wind Turbine)

Rüzgâr türbinleri; çok farklı yapılara sahip olmakla birlikte milinin yatay ya da düşey olmasına göre sınıflandırılırlar. Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbini modeli; yatay eksenli olan türbin modelidir. Bu çalışmada da yatay eksenli bir rüzgâr türbin modeli esas alınmıştır. Rüzgâr türbini tarafından rüzgârdan çekilebilen mekanik güç

$$P_m = 0.5\rho A c_p V_r^3 \quad (1)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada ρ ; hava yoğunluğu (kg/m^3), A ; kanatların süpürdüğü alan, c_p ; performans katsayısı ve V_r ; rüzgâr hızı (m/s) değerlerini temsil etmektedir. Performans katsayısının değeri; Betz limiti olarak bilinen 0,59 değeri ile sınırlı olup kanatların mekanik tasarımına, kanat açısına (β) ve kanat uç hız oranına (λ) bağlı olarak değişmektedir. Literatür çalışmalarında sıklıkla kullanılan rüzgâr türbini modeli performans katsayısına ilişkin ifade aşağıda verilmiştir.

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) 116 - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

Burada verilen sabit katsayılar kanatların mekanik tasarımına göre değişebilen katsayılardır. Kanat açısı nominal rüzgâr hızının üzerine çıkıldığında değiştirilerek türbinin devreden çıkarma hızına dek sabit güçte çalışmasını temin etmek için kullanılır. Kanat uç hız oranı ise;

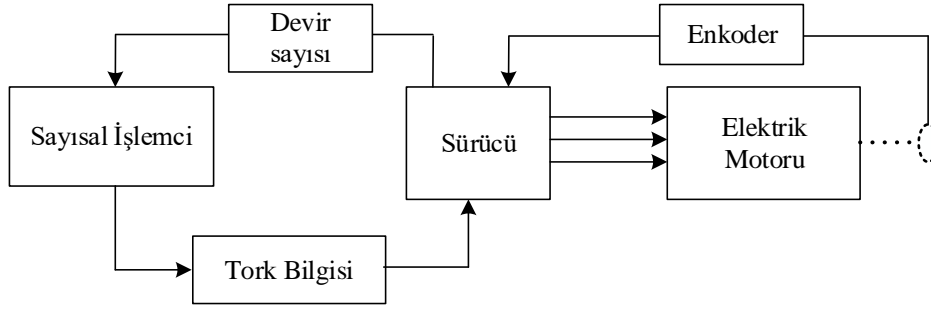
$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_w} \quad (3)$$

denklemleri ile verilir ve MGNT çalışmaları için optimum değerinde sabit tutulması gerekmektedir. Burada R ; kanat yarıçapı (m) ve ω_m ; açısal hız (rad/s) değerlerini temsil etmektedir. Türbin tarafından generatöre aktarılan mekanik moment (T_m) denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (4)$$

(4) denklemleri ile aerodinamik rüzgâr enerjisi türbin tarafından mekanik momente dönüştürülmüş olur.

Gerçek zamanlı bir çalışma yapabilmek amacıyla eğer gerçek bir rüzgâr enerji santralinde çalışabilme imkânı [12] yoksa iki farklı yaklaşım öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi; yapay bir rüzgâr kanalı oluşturulup girişine fanlar aracılığıyla yapay rüzgâr uygulanması ve çıkışına endüstriyel bir rüzgâr türbininin konumlandırılması ile kurulan modeldir [13–16]. Bir diğer yaklaşım ise; literatürde sıklıkla kullanılan bir rüzgâr türbini matematiksel modelinin bir sayısal işlemciye aktarılması ve bu modelin sürücü üzerinden bir elektrik motoruna uygulanması ile gerçekleştirilen modeldir [17–25]. Böylelikle kullanılan elektrik motorunun bir rüzgâr türbini olarak davranması sağlanmış olur. Bu çalışmada bu yöntem kullanılmış olup blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir. Elektrik motorunun şaftına bağlı olan enkoderden devir sayısı bilgisi alınır ve sürücüye gönderilir. Sayısal işlemciye yüklenmiş olan türbin matematiksel modelinin (denklem (1)-(4)), üretebileceği moment için devir sayısı bilgisine ihtiyacı vardır. Sayısal işlemci, makine devir sayısına göre türbin matematiksel modelini kullanarak bir moment değeri üretir ve bu moment değeri sürücü üzerinden elektrik motoruna uygulanır.



Şekil 2. Gerçek zamanlı rüzgâr türbini modeli blok diyagramı (The block diagram of the real time wind turbine model)

Bu çalışmada elektrik motoru olarak 3 fazlı 4 kW, 710 devir/dakika'da 53,8 Nm moment üretebilen bir asenkron motor kullanılmıştır. ASM sürücüsü olarak, 3 fazlı, 4 kW gücünde, hız ve tork kontrol özelliğine sahip endüstriyel bir sürücü (Allen Bradley PowerFlex 753) kullanılmıştır. Motor hız bilgisinin sürücü üzerinden okunması, referans tork değerinin hesaplanması ve hesaplanan referans tork değerinin sürücüye iletilmesi için ADUC 841 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Belirtilen işlemler işlemciye fazla bir hesap yükü getirmediğinden, Analog-Dijital ve Dijital-Analog dönüştürücü birimlerine sahip herhangi bir işlemci de tercih edilebilir.

2.2. Generatör (Generator)

Rüzgâr enerji sistemlerinde elektrik üretmek için kullanılan generatörler; senkron generatör, sincap kafesli asenkron generatör, çift beslemeli asenkron generatör ve sürekli mıknatıslı senkron generatör olarak verilebilir. Her bir generatör tipinin birbirine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Bu çalışmada sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) kullanılmıştır. Mıknatıs maliyetleri ve mıknatısların demanyetizasyonu gibi dezavantajları olmasına rağmen, harici bir elektriksel tahrik olmaksızın bu gereksinimini yapısında konumlandırılan sabit mıknatıslardan temin eden SMSG; küçük ve orta ölçekli rüzgâr enerji sistemlerinde en çok kullanılan makine tiplerinden birisidir [26, 27]. Seçilen SMSG; 480 devir/dakika'da 44.5 Nm moment ile 1.8 kW güç üretebilen 8 çift kutuplu bir generatördür. SMSG'lerin en önemli üstünlüklerinden birisi de, vites kutusu olmaksızın rüzgâr türbinine ya da rüzgâr türbin emülatörüne doğrudan bağlantı yapılabilmesidir. Bu çalışmada asenkron motorun şaftına doğrudan akupile edilerek kullanılmıştır.

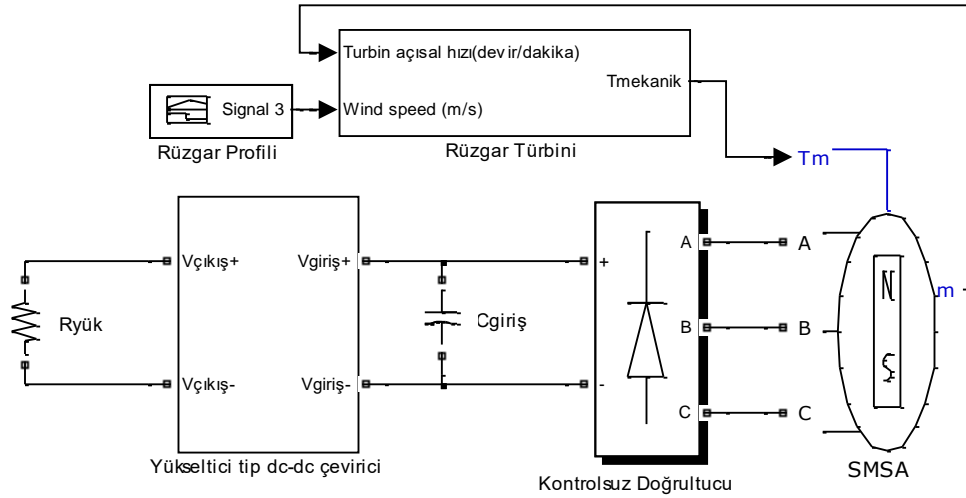
2.3. Güç Dönüştürücü Birimi (Power Converter Unit)

Generatörden çıkan 3 fazlı elektrik enerjisi, tüketiciye ulaşmadan önce çeşitli amaçlar ile güç dönüştürücü birimleri tarafından düzenlenirler. Bu amaçlardan bir tanesi MGNT çalışmalarını yapmak, bir diğeri de şebeke bağlantı ölçütlerini sağlayarak elektrik enerjisini tüketiciye aktarmaktır. Böylelikle hem verim çalışmaları hem de güç kalitesi çalışmaları yapılmış olur. Güç dönüştürücü birimi için birçok farklı topoloji kullanımı önerilmiştir. Ancak en çok kullanılan yapılar; peş peşe bağlı olan kontrollü doğrultucu-kontrollü evirici yapısı ya da kontrolsüz doğrultucu, dc-dc çevirici ve evirici yapısıdır. Eğer sadece MGNT çalışması yapılacak ise amaçtan uzaklaşmamak adına evirici yapısı elimine edilerek yerine doğrudan yükü temsil eden omik direnç kullanılır. Bu çalışmada, otonom bir sistem için MGNT çalışmaları yapabilmek amacıyla; generatör çıkışında 3 faz kontrolsüz doğrultucu kullanılmış ve dc-dc yükseltici tip dönüştürücü üzerinden elektrik enerjisi yüke bağlanmıştır. Kullanılan bu güç dönüştürücü topolojisi düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve daha kolay kontrol edilebilme kabiliyeti ile literatür çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [28, 29].

2.4. Rüzgâr enerji sistemi benzetim modeli (The simulation model of wind energy system)

Önceki bölümlerde verilen rüzgâr enerji sistemi modeli, bir benzetim programı kullanılarak da modellenilebilir. Literatür çalışmalarında bu amaçla Matlab/Simulink, PSCAD, PowerSim vb. paket programları kullanılmaktadır. Şekil 3'te Matlab/Simulink kullanılarak oluşturulmuş benzetim modeli verilmektedir. Üretilen rüzgâr hız profili ve devir sayısına göre rüzgâr türbini modeli bir mekanik moment üretir. Bu moment doğrudan şafta akupile SMSG'ye uygulanarak 3 faz çıkışından elektriksel enerji elde edilir. 3 faz tam dalga kontrolsüz doğrultucu ile dc işarete dönüştürülen elektrik enerjisi, bir kondansatör

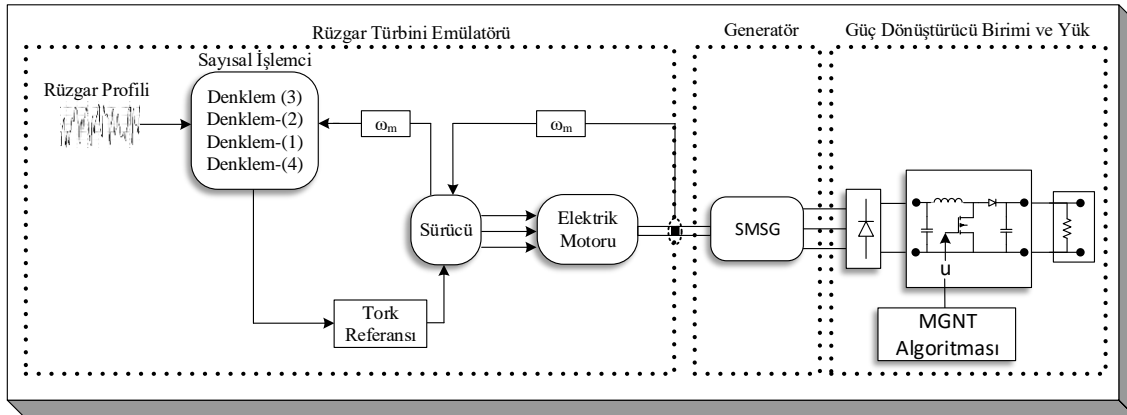
yardımıyla regüle edilir. Yükseltici tip dc-dc çeviricide, MGNT çalışmaları ile türbin devir sayısı ayarı yapılarak elde edilen elektriksel enerji yükü temsil eden omik dirence aktarılır.



Şekil 3. Rüzgâr enerji sistemi benzetim modeli (The simulation model of the wind energy system)

3. DEĞERLENDİRME (SURVEY)

Bu çalışmada kullanılan gerçek zamanlı rüzgâr enerji sistemi blok diyagramı olarak Şekil 4'te verilmiştir. Rüzgâr türbini matematiksel modeli şekilde belirtilen işlem sırasına göre sayısal işlemciye aktarılır. Rüzgâr profili sayısal işlemciye look-up tablosu olarak kaydedilir. Sürücü üzerinden açısal hız bilgisinin de alınması ile rüzgâr türbininin üreteceği mekanik moment hesaplanır ve sürücü üzerinden motora gönderilir. Motor şaftına akuple olan generatör 3 faz çıkışı doğrultularak dc-dc yükseltici tip dönüştürücüye aktarılır. Dönüştürücünün kontrol işareti kontrolör ile ayarlanarak MGNT çalışmaları yapılabilir ve elde edilen elektriksel güç; yükü temsil eden çıkıştaki omik dirence gönderilir.



Şekil 4. Gerçek zamanlı rüzgâr enerji sistemi blok diyagramı (The block diagram of the real time wind energy system)

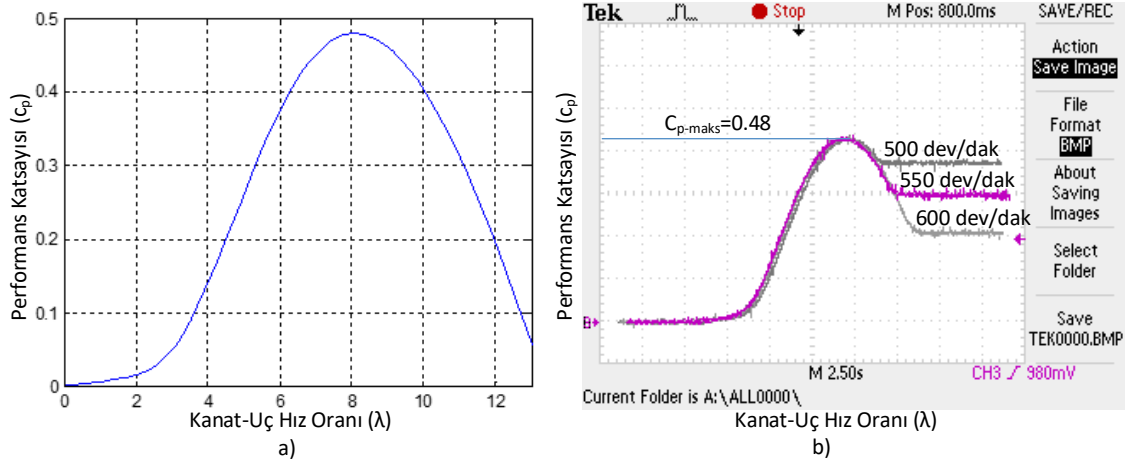
Rüzgâr enerji sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleşmesi Şekil 5'te verilmiştir. 1 numara ile gösterilen birim sayısal işlemci olup rüzgâr türbini matematiksel modeli bu işlemciye aktarılmıştır. 2 numara ile gösterilen AC motor sürücüsü, hız sınırlamalı tork referanslı olarak kullanılmaktadır. Motorun şaftına akuple edilen enkoderden devir sayısı bilgisini alır ve 0-2.5 V aralığında analog sinyal olarak sayısal işlemciye gönderir. Devir sayısı bilgisini alan sayısal işlemci; o devir sayısına göre türbinin üretebileceği moment referans değerini yine 0-2.5 V aralığında analog işaret olarak sürücüye gönderir. Sürücü bu moment değeri için gerekli olan tetiklemeleri yaparak 3 numara ile belirtilen asenkron motora uygular ve rüzgâr türbini gibi davranmasını sağlar. 4 numara ile belirtilen SMSG, asenkron motor tarafından tahrik edilerek döndürülür.

SMSG tarafından üretilen elektrik enerjisi, 5 numara ile belirtilen kontrolsüz tam dalga doğrultucu ve yükseltici tip dc-dc çeviriciye gönderilir. Güç birimi olarak adlandırılan 5 numaralı birimde, bir sayısal işlemci kullanılarak yükseltici tip dc-dc çeviricinin doluluk oranı ayarlanabilir ve böylelikle türbin devir sayısı değiştirilerek MGNT çalışmaları yapılabilir. 6 numara ile belirtilen birim ise yükü temsil eden omik bir dirençtir. Böylesi bir birim kullanılarak MGNT çalışmalarının yapılabilmesinin yanı sıra omik direncin yerine bir evirici birimi bağlanılarak elde edilen elektriksel güç şebekeye de aktarılabilir. Bu durumda hem MGNT hem de şebeke entegrasyonu üzerinde istenilen akademik çalışma deneysel olarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 5. Gerçek zamanlı rüzgâr enerji sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi (The implementation of a real-time wind energy system in laboratory environment)

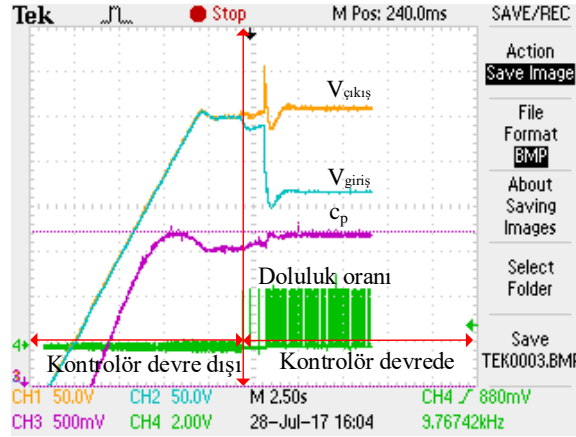
Bu amaçla Şekil 5 ile verilen düzenek kullanılarak performans katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi deneysel olarak elde edilmiş ve aynı matematiksel modeli kullanan Matlab/Simulink bloğu ile elde edilen grafik ile kıyaslanarak Şekil 6'da sunulmuştur. Generatörü aşırı yüklemekten korumak amacıyla deneysel düzeneğe AC sürücü üzerinden Şekil 6b ile verildiği gibi hız sınırlaması uygulanmıştır. Benzetim modelinden elde edilen sonuç ise Şekil 6a ile verildiği gibidir. Her iki sonuç kıyaslandığında deneysel model ile benzetim modelinin grafiklerinin aynı olduğu ve dolayısıyla gerçek zaman uygulamalar için deneysel modelin kullanılabilceği sonucu ortaya çıkmıştır. Böylelikle bu model kullanılarak MGNT çalışmaları yapmak mümkündür.



Şekil 6. Performans katsayısının a) benzetim, b) deneysel olarak elde edilmesi (To obtaining the performance coefficient by using a) simulation, and b) experiment)

MGNT çalışması yapmak için sayısal işlemciye kontrol algoritması yüklenmiş ve sabit bir rüzgâr hızında elde edilen sonuç Şekil 7 ile verilmiştir. Kontrolör devre dışı iken yükseltici tip dc-dc dönüştürücünün

tetiklemesi yapılmadığından, devrenin giriş gerilimi çıkış gerilimine eşit olacaktır. Daha sonra kontrolör devreye alınmış ve yükseltici tip dc-dc dönüştürücünün giriş gerilimi, çıkış gerilimi, doluluk oranı ve rüzgar enerji sistemine ilişkin performans katsayısının değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere maksimum güç noktası işletiminin göstergesi olan performans katsayısı, kontrolör devre dışı iken maksimum değerinde değildir. Kontrolörün devreye alınması ile birlikte performans katsayısı maksimum değerine çıkmış ve sistemin maksimum güç noktasında işletimi sağlanabilmiştir.



Şekil 7. Sabit bir rüzgar hızı için MGNT çalışmasının yapılması (MPPT study for a constant wind speed)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada gerçek zamanlı bir rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleşmesi aşama aşama anlatılmıştır. Kullanılan düzenek literatür çalışmalarında birçok kez kullanılmış olmasına rağmen düzeneğin kurulumuna dair detaylı bilgi elde edebilmek çoğu kez mümkün değildir. Bu amaçla; bu alanda çalışma yapacak kişilere faydalı olacağı düşünülerek düzeneğin kurulumu detaylı olarak verilmiştir. Kurulan düzenekte MGNT çalışmaları için önce performans katsayısına ilişkin grafik elde edilmiş ve ardından sabit bir rüzgar hızında, kontrolörün devreye alınması ile sistemin maksimum güç noktası referansına getirildiği gösterilmiştir. Kurulan deneysel düzenek daha çok MGNT çalışmaları için kullanılabilir olsa dahi çıkışa bağlanan omik direnç yerine evirici bağlanarak şebeke senkronizasyonu sağlanabilir. Böylelikle otonom olmaktan çıkan düzeneğin şebeke bağlantısı sağlanarak güç kalitesine etkisi vb. birçok alanda çalışma yapmak mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Atabey, G., Tezcan, S.S., Rüzgâr Santrallerinin Modellenmesi ve Rüzgâr Santrallerinin İletim Sistemi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 5:3, (2017), 197–212.
- [2] Çelik, İ., Yıldız, C., Şekkeli, M., Rüzgâr Enerji Santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 6:4, (2018), 898–908.
- [3] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, and T. Chee Wei, A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy System, IEEE Conference on Clean Energy and Technology, (2011) 321–326.
- [4] R. Saidur, M. R. Islam, N. A. Rahim, and K. H. Solangi, A review on global wind energy policy, Renew. Sustain. Energy Rev., 14:7 (2010) 1744–1762.
- [5] I. Şerban and C. Marinescu, A sensorless control method for variable-speed small wind turbines, Renew. Energy, 43 (2012) 256–266.
- [6] International Energy Agency, Wind energy technology roadmap, (2009).
- [7] J. Castelló, J. M. Espí, and R. García-Gil, Development details and performance assessment of a Wind Turbine Emulator, Renew. Energy, 86, (2016) 848–857.

- [8] J. Lee and Y. Kim, Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier, *IET Renew. Power Gener.*, 10:2 (2016) 194–202.
- [9] D. Song, J. Yang, Z. Cai, M. Dong, M. Su, and Y. Wang, Wind estimation with a non-standard extended Kalman filter and its application on maximum power extraction for variable speed wind turbines, *Appl. Energy*, 190 (2017) 670–685.
- [10] L. He, Y. Li, and R. G. Harley, Adaptive multi-mode power control of a direct-drive PM wind generation system in a microgrid, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 1:4 (2013) 217–225.
- [11] Z. M. Dalala, Z. U. Zahid, W. Yu, Y. Cho, and J. S. Lai, Design and analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 28:3 (2013) 756–767.
- [12] Z. Ma, A Sensorless Control Method for Maximum Power Point Tracking of Wind Turbine Generators, *European Conference on Power Electronics and Applications*, (2011) 1–10.
- [13] C.-T. Pan and Y.-L. Juan, A Novel Sensorless MPPT Controller for a High-Efficiency Microscale Wind Power Generation System, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 25:1 (2010) 207–216.
- [14] H. Fathabadi, Maximum mechanical power extraction from wind turbines using novel proposed high accuracy single-sensor-based maximum power point tracking technique, *Energy*, 113 (2016) 1219–1230.
- [15] H. Fathabadi, Novel high efficient speed sensorless controller for maximum power extraction from wind energy conversion systems, *Energy Convers. Manag.*, 123, (2016) 392–401.
- [16] C. Lee, P. Chen, and Y. Shen, Maximum power point tracking system of small wind power generator using RBFNN approach, *Expert Syst. Appl.*, 38:10 (2011) 12058–12065.
- [17] X. Yuan, F. Wang, D. Boroyevich, R. Burgos, and Y. Li, DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak-grid systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, 24:9 (2009) 2178–2192.
- [18] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System, *IEEE Trans. Power Electron.*, 26:12 (2011) 3609–3620.
- [19] Y. Zhu, M. Cheng, W. Hua, and W. Wang, A Novel Maximum Power Point Tracking Control for Permanent Magnet Direct Drive Wind Energy Conversion Systems, *Energies*, 5:12 (2012) 1398–1412.
- [20] J. Chen, J. Chen, and C. Gong, Constant-bandwidth maximum power point tracking strategy for variable-speed wind turbines and its design details, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60:11 (2013) 5050–5058.
- [21] S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58:1 (2011) 29–36.
- [22] I. Kortabarria, J. Andreu, I. Martínez de Alegría, J. Jiménez, J. I. Gárate, and E. Robles, A novel adaptative maximum power point tracking algorithm for small wind turbines, *Renew. Energy*, 63 (2014) 785–796.
- [23] R. J. Wai, C. Y. Lin, and Y. R. Chang, Novel maximum-power-extraction algorithm for PMSG wind generation system, *IET Electr. Power Appl.*, 1:2 (2007) 275–283.
- [24] H. Camblong, I. M. de Alegría, M. Rodriguez, and G. Abad, Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers, *Energy Convers. Manag.*, 47:18–19 (2006) 2846–2858.
- [25] P. Tenca, A. A. Rockhill, and T. A. Lipo, Wind Turbine Current-Source Converter Providing Reactive Power Control and Reduced Harmonics, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 43:4 (2007) 1050–1060.
- [26] A. M. Eltamaly and H. M. Farh, Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control, *Electr. Power Syst. Res.*, 97 (2013) 144–150.

- [27] H. S. Kim and D. D.-C. Lu, "Review on wind turbine generators and power electronic converters with the grid-connection issues," Australasian Universities Power Engineering Conference, (2010) 1–6.
- [28] R. Esmaili, L. Xu, and D. K. Nichols, "A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application," IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2005) 1–6.
- [29] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16:5 (2012) 3220–3227.



Mekanik Alaşım ile Üretilen Nanokristal Fe₆₀Al₃₀Cu₁₀ (at.%) Tozların Yapısal ve Mekanik Özellikleri

Barış AVAR^{1,*}, Tuncay ŞİMŞEK², Musa GÖĞEBAKAN³

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100, ZONGULDAK

²Mersin Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, 33343, MERSİN

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 46100, KAHRAMANMARAŞ

Öz

Bu çalışmada, nanoyapılı Fe(Al,Cu) katı çözeltilisi, elementel tozların mekanik alaşım (MA) işlemi ile sentezlenmiştir. Toz karışımlar, 50 saatlik öğütme süresince çeşitli zaman aralıklarında gezegensel bilyeli değirmende öğütülmüştür. Numunelerin yapısal ve mekanik özellikleri X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu/ enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM/EDX) ve Vickers mikrosertlik (HV) testi ile incelenmiştir. 10 saatlik öğütme işleminden sonra bütün Al ve Cu atomları ymk-Fe(Al,Cu) katı çözeltilisini oluşturmak üzere Fe kafesi içinde çözülmüştür. Toz alaşımların parçacık morfolojisi öğütme süreleri boyunca soğuk kaynaklanma, kırılma ve kararlı durum aşamalarını göstermiştir. 50 saatlik öğütme işleminden sonra parçacık boyutu ve kristalit boyutu, sırasıyla ~ 500 nm ve ~ 6 nm'ye düşmüştür. Bununla birlikte, mikrosertlik değerleri artan öğütme süresiyle birlikte artmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 15/10/2018

Düzeltilme: 04/01/2019

Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Mekanik alaşım

Fe-Al-Cu alaşımı

XRD

SEM

Vickers sertlik

Keywords

Mechanical alloying

Fe-Al-Cu alloy

XRD

SEM

Vickers hardness

Structural and Mechanical Properties of Nanocrystalline Fe₆₀Al₃₀Cu₁₀ (at.%) Powders Prepared by Mechanical Alloying

Abstract

In the present study, the nanostructured Fe(Al,Cu) solid solution was synthesized by mechanical alloying (MA) process of the elemental powders. The powder mixtures were milled in a planetary ball mill for various periods of time, up to 50 h. The structural and mechanical properties of the samples were studied by using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDX) and Vickers microhardness test. Results indicated that after 10 h of milling, all Al and Cu atoms were dissolved into the Fe lattice to form bcc-Fe(Al,Cu) solid solution. The particle morphology of the alloys was followed the cold welding, fracturing and steady state stages during milling times. Both particle size and crystallite size were reduced to ~500 nm and ~6 nm, respectively after 50 h of milling. However, the microhardness values increased with the increasing milling time.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzeme biliminde alaşımların üretilmesi ve özelliklerinin araştırılarak geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar, mikroyapısı tamamen farklı olan yeni alaşımların keşfedilmesine yol açmıştır. Bu alaşımların en önemlilerinden bazıları yarıkararlı alaşımlar olarak bilinen amorf, nanokristal ve kuazikristal alaşımlarıdır. Bunlar arasında nanokristal malzemeler, kristal boyutu 100 nm'nin altında tek-fazlı ya da çok-fazlı polikristallerden oluşmaktadır. Malzeme içinde homojen olarak dağılan nanoboyutlu kristaller, malzemeye yeni özellikler kazandırmaktadır. Bu nedenle nanokristal malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, aynı kompozisyondaki polikristal malzemelerin özelliklerinden farklı ve çoğu zaman daha üstündür. Kristal tane boyutu azalarak nanoboyut mertebelerine ulaşıldığında bu tür malzemelerin sertlik özelliklerinde büyük ölçüde iyileşmeler olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, bu alaşımların korozyona karşı dirençleri ve manyetik özelliklerinin normal kristal yapıdaki karşıtlarından tamamen farklı olduğu ve

*İletişim yazarı, e-mail: barisavar@beun.edu.tr

bazı durumlarda ise daha üstün özellikler sergiledikleri rapor edilmiştir [1-4]. Örneğin Fe-esaslı nanokristal alaşımlar; yüksek mukavemet, korozyona karşı dirençleri ve hafif olmaları bakımından otomotiv ve uçak sanayinde, iletkenlik, ısı kaybının az olması ve iyi manyetik özellikleri bakımından elektrik ve elektronik sanayinde, özellikle başta güç dağıtım trafoları olmak üzere manyetik kayıt, video ve kayıt sistemlerinin manyetik okuyucu yapımında kullanılmasıyla teknolojinin birçok alanında nanokristal malzemeler kullanılmaktadır [5].

Mekanik alaşımlama (MA), endüstriyel ölçekte nanoyapılı toz malzemelerin hazırlanması için ilgi çekici ve hızlı gelişen yöntemlerden biridir. Katılaştırma işlemine kıyasla, MA ile nanokristal fazın elde edilmesi daha kolaydır. MA işlemi, katı halde gerçekleştiği için denge diyagramlarının belirlediği şartların dışına çıkılabilmektedir [2,6]. Dolayısıyla MA tekniği ile oda sıcaklığında, daha geniş bir bileşim aralığında nanokristal alaşımların üretimi mümkündür.

Son yıllarda Fe-Al, Fe-Cu ve Fe-Al-Cu alaşım sistemlerinin MA ile üretilmesi üzerine bir takım çalışmalar bildirilmiştir. MA işlemi sonucunda elde edilen α -Fe(Al) aşırı doymuş katı çözeltilerin çoğunlukla $x \leq 60$ at.% Al durumunda gerçekleştiği, ancak bazı çalışmalarda da $x = 75$ at.% Al durumunda olduğu bildirilmiştir [7-10]. Eckert ve ark. [11], Fe_xCu_{100-x} sisteminde tek-fazlı yüzey merkezli kübik (ymk) alaşımlarının $x < 60$ olduğunda ve tek-fazlı hacim merkezli kübik (hmk) alaşımlarının $x > 80$ olduğunda MA ile elde edilebileceğini rapor etmişlerdir. Bu alaşım sistemlerine üçüncü elementlerin eklenmesi, malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde ve alaşım tasarımında kritik öneme sahiptir. Krifa ve ark. [12], $Fe_{50}Al_{30}Cu_{20}$ (wt.%) alaşımında öğütme işleminin ilk safhasında Al ve Cu atomlarının Fe içinde çözüldüğünü, öğütmenin sonunda ise yaklaşık 9 nm kristalit boyutuna sahip hmk Fe(Al,Cu) katı çözeltileri oluştuğunu belirtmişlerdir. Öğütme işlemine tabi tutulan metal tozların manyetik davranışının, kristalit boyutun azalmasıyla birlikte mikroyapısal değişime bağlı olduğu bulunmuştur. Aynı yazarların yaptığı bir diğer çalışmada ise [13], MA işlemi uygulanan $(Fe_{60}Al_{40})_{80}Cu_{20}$ (wt.%) tozların ilk saatlerinde Fe(Al,Cu) katı çözeltileri içerisinde homojen olmayan Cu dağılımı meydana gelmiş, X-ışını difraksiyonu (XRD) analizinde Cu, Fe(Al) ve Fe (Al,Cu) olmak üzere üç farklı faz belirlenmiştir. Öğütme süresinin artmasıyla beraber bütün Cu atomları, Fe(Al) örgüsünde çözünerek 10 nm ortalama kristalit boyutuna sahip nanokristal Fe(Al,Cu) katı çözeltilerini oluşturmuştur. Böylece kristalit boyutun azalmasıyla daha sert ferromanyetik malzeme elde edilmiş ancak, termal titreşimler nedeniyle yüksek sıcaklıklarda manyetik özelliklerde bir düşüş meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise MA ile elde edilen $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ (at.%) toz alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Farklı öğütme süreleri sonrasında elde edilen alaşımlar XRD, SEM/ EDX ve Vickers sertlik yöntemleri ile karakterize edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

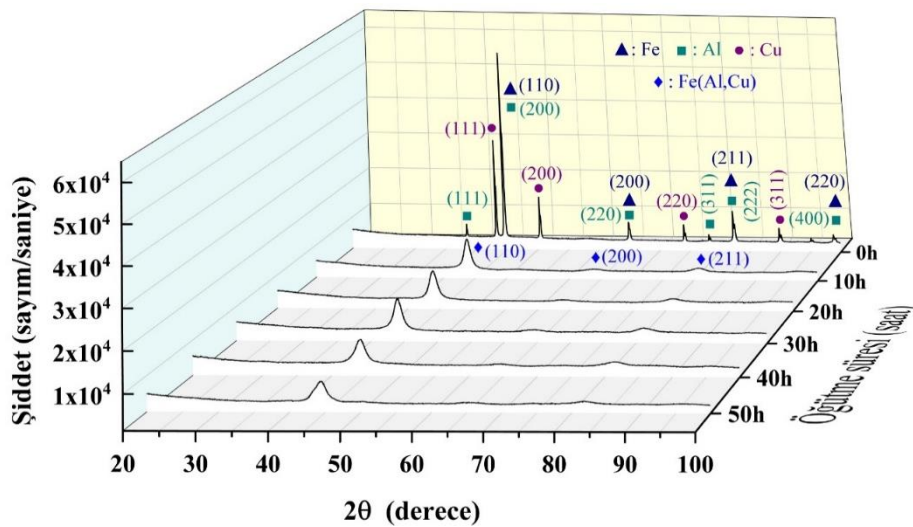
Bu çalışmada elementel Fe (Merck, % 99.9, < 10 μ m), Al (Merck, % 99.5, < 45 μ m) ve Cu (Merck, % 99.9, < 63 μ m) tozlarından MA tekniğiyle nanoyapılı $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ (at.%) alaşımı sentezlenmiştir. Deneysel, gezegensel tip öğütücüde (Fritsch Pulverisette-5) argon atmosferinde 250 ml hacimli paslanmaz çelik havan ve 10 mm çapa sahip bilyelerle gerçekleştirilmiştir. Tozların oksitlenmemesi için tüm tartım ve numune alım işlemleri argon atmosferli eldivenli kabinde yapılmıştır. $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ kompozisyonunu oluşturan tozlar 10, 20, 30, 40 ve 50 saat süre ile öğütülmüştür. Belirli periyotlarda atmosferli kabin içerisinden bir miktar toz alınarak analiz edilmiştir. Bilye-toz kütle oranı 10:1, dönme hızı olarak ise 300 dev/dak olarak belirlenmiştir. MA deneylerinde aşırı ısınmadan kaçınmak ve verimi artırmak için, her 20 dakika öğütme işleminden sonra 20 dakika bekleme ve her 40 dakikada bir ters yönde öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen alaşım tozlarının faz yapıları XRD (Panalytical Empyrean) ile belirlenmiştir. $CuK\alpha$ ışınması ($\lambda=1.54\text{\AA}$), 45 kV voltaj ve 40 mA akım ile 2θ aralığı 20° den 100° ye kadar 0.026° adım aralığında ölçümler alınmıştır. Tozların faz tanımlamaları, kristalit boyutları ve örgü gerinimleri X'Pert High Score yazılımı ve ICDD-PDF 2 dataları ile belirlenmiştir. Alaşım tozlarının morfolojileri, parçacık boyutu ölçümleri ve EDX haritalama incelemeleri FEI-Quanta FEG 450 marka SEM cihazı ile ve bu cihaza bağlı Bruker Quantax 200 marka EDX ile yapılmıştır. Toz alaşımların yüzey sertliklerini ölçmek için Vickers uçlu Shimadzu HMV-2 model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Ölçüm öncesi sentezlenen tozlar, tek eksenli hidrolik pres kullanımı ile 15 MPa basınç altında 5 dakika bekletilerek soğuk preslenmiştir. Preslenen numuneler epoksi-resin malzemesiyle tabletler halinde kalıplanarak sonrasında zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Ölçümler, 25 °C'de 980.7 mN ($HV_{0.1}$) yükte 10 s bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Yüzey sertlik değerleri aşağıdaki eşitlikle (Eş. 2.1) ile hesaplanmıştır.

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \quad 2.1$$

Burada; P uygulanan yük, d uygulanan yük sonucu oluşan izin köşegen uzunluğu, θ ise elmas ucun zıt yüzeyleri arasındaki açı olup, 136° 'dir. Ölçüm yapılan her bir numunenin 5 farklı bölgesinden alınan sertlik değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır.

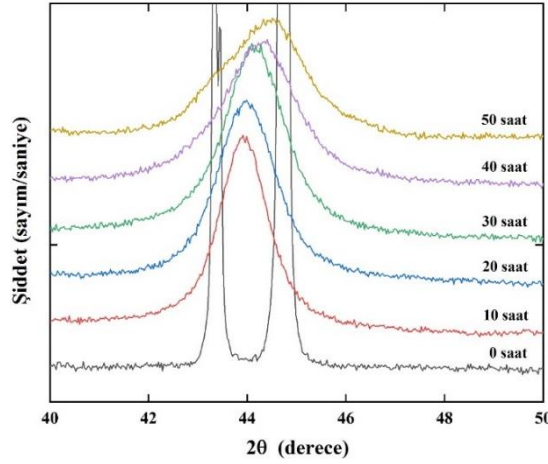
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Şekil 1'de 50 saate kadar mekanik alaşımlanan $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ tozlarının XRD grafiği verilmiştir. Paslanmaz çelik hazne içerisinde öğütülen tozlar, her 10 saatte bir atmosfer kontrollü kabin içerisinde alınarak XRD ile incelenmiştir. Başlangıç elementel tozlarının XRD deseni incelendiğinde (0 h), başlangıç tozları olan hmk-Fe (Im-3m, ICDD Card No: 87-0721, kübik), ymk-Al (Fm-3m, ICDD Card No: 99-005, kübik) ve ymk-Cu (Fm-3m, ICDD Card No:04-0836, kübik) fazlarına ait pikler görülmektedir. İlk 10 saatlik öğütme sonrasında başlangıç tozlarından Al fazına ait (111), (200), (220), (311), (222) ve (400) pikleri ve Cu fazına ait olan (111), (200), (220) ve (311) karakteristik piklerin tamamen kaybolduğu belirlenmiştir. Öğütmenin ilk aşamalarından itibaren Fe(Al,Cu) katı çözeltilisine ait $2\theta=43.88^\circ$, $2\theta=64.14^\circ$ ve $2\theta=80.79^\circ$ açılarında yansıyan pikler, başlangıç tozlarının hmk-Fe(Al,Cu) fazına dönüştüğünü göstermektedir. Bu durum ilk 10 saatlik öğütme sonrasında Al ve Cu elementlerinin Fe fazı içerisinde çözüldüğünü ortaya koymaktadır. MA işlemi sırasında katı çözelti oluşumu, öğütülmüş tozlar tarafından emilen büyük miktardaki örgü gerinimi enerjisine bağlıdır. Bu gerilmeler, öğütülmüş tozun örgüsünde birçok boşluk yaratmaya yönelik bir itici güç sağlama kapasitesine sahiptir. Böylece alaşım elementlerinin aktivasyon enerjisi azalır ve difüzyonun artmasına neden olur. Bu durum, alaşım elementlerinin örgü kusurlarında yer alma eğilimini artırır ve dolayısıyla katı çözelti formları oluşmaya başlar [14,15]. 20 saatlik öğütmede ise, oluşan yeni faza ait piklerin şiddeti azalmış ve piklerin altındaki alan genişlemiştir. Artan öğütme süresine bağlı olarak pik şiddetlerinin azalması ve Şekil 2'de görüldüğü üzere yansıma açılarının büyük 2θ açılara kayması, Fe fazı içerisinde zamanla Al ve Cu'nun çözünmesini ve parçacık boyutunun azaldığını göstermektedir. Öğütme süresinin artmasıyla piklerin genişlemesi, parçacıkların kristalit boyutunun azalmasıyla birlikte aynı zamanda örgü parametrelerindeki artıştan da kaynaklanmaktadır [12]. Bilindiği gibi MA işleminde tozlar bilyelere ve öğütme haznesine çarpışmanın etkisiyle soğuk kaynaklanmakta, yassılaşıp ve tekrar kırılmaktadır. Öğütme süresi arttıkça parçacıklar sürekli olarak bu yassılaşıp, kırılma ve soğuk kaynaklanmakta, parçacık boyutunun azalmasıyla yüzey alanı artmaktadır. Bu işlem devam ettikçe parçacıkların boyutunun azalmasıyla XRD deseninde yansıyan piklerin şiddeti azalmakta ve altlarında kalan alanlar genişlemektedir.



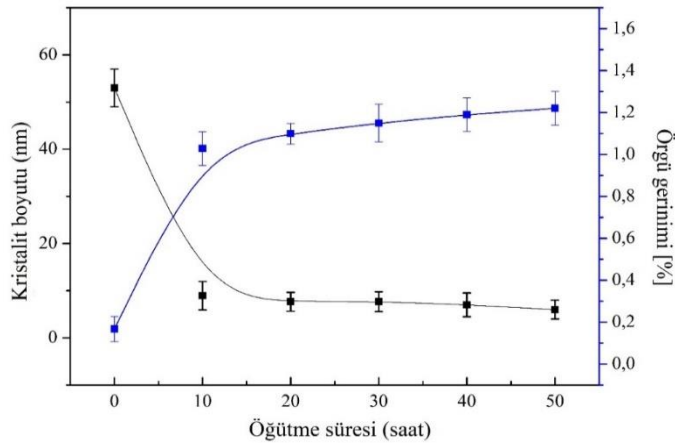
Şekil 1. $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ alaşımının farklı öğütme süreleri sonrası XRD desenleri

Al ve Cu'nun oluşan Fe(AlCu) fazı içerisindeki katı çözelti formu Şekil 2'de görülebilmektedir. Şekil 2'den öğütme süresinin artmasıyla Fe(AlCu) fazına ait 43.88° 'deki pikin daha büyük 2θ açılarında doğru kayması, öğütme süresine bağlı olarak katı çözelti yapısının oluşmaya devam ettiği, 50 saatlik öğütme sonrasında ise doygun bir çözelti meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum aynı zamanda öğütülen tozların kompozisyonu, örgü sıkışması ve Al ve Cu'nun Fe örgüsü içine girmesiyle ilişkilidir.



Şekil 2. Öğütme süresine bağlı olarak $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ alaşımının $2\theta=40-50^\circ$ arasındaki değişimi

Toz alaşımların MA süresince kristalit boyut ve örgü gerinimindeki değişimler ise Şekil 3'te görülmektedir. Genellikle, öğütme işleminin başlarında yumuşak olan başlangıç elementel tozları, çarpışmaların etkisiyle topaklanmakta ve bu aşamada tozların soğuk kaynaklanması daha baskın mekanizma olduğu için ortalama parçacık boyutu artarken, uzun öğütme sürelerinde tozlar daha kırılabilir olduğu için kırılma mekanizmalarının hızlanmasıyla parçacık boyutu ve buna bağlı olarak kristalit boyutu giderek azalmaktadır [16]. Şekil incelendiğinde, $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ katı çözeltisinin kristalit boyutunun ilk 10 saat sonunda 55.90 nm 'den 7.67 nm 'ye çok hızlı bir şekilde düştüğü, artan öğütme süresine bağlı olarak kristalit boyutunda küçük değişimler gözlemlendiği ve 50 saat sonunda kristalit boyutunun yaklaşık olarak 5.99 nm olduğu tespit edilmiştir. Başlangıç elementlerinin çözünmesinin, belirli bir doygunluğa ulaştığında kristalit boyutunda çok küçük değişimler olmaktadır. $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ 'nun örgü gerinimi ise öğütmenin ilk safhalarından itibaren tozların şiddetli plastik deformasyonu neticesinde artan sayıda matris dislokasyondan dolayı hızlıca artarak 20 saatlik öğütme sonrasında $\% 1.15$ olmuştur. 20 saatten sonra yavaşça artarak 50 saatte maksimum değeri olan $\% 1.25$ 'e ulaşmıştır. Dislokasyonların etkileşimi kristalit boyutunu azaltırken örgü gerinimini artırmıştır. MA işleminde tekrarlanan soğuk kaynaklanma, yassılaştırma ve kırılma mekanizmalarından kaynaklanan parçacıklardaki enerji artışından dolayı bu durumla sık bir şekilde karşılaşmaktadır [17]. Böylece parçacıkların boyutu azalırken örgü gerinimi değerleri artış göstermektedir.

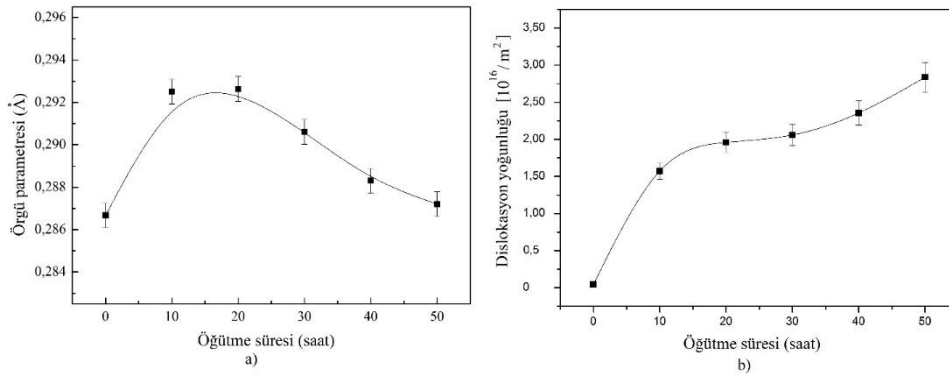


Şekil 3. $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ alaşımının öğütme süresine bağlı olarak kristalit boyutundaki ve örgü gerinimindeki değişimler

Şekil 4'te öğütme süresine bağlı olarak örgü parametresindeki ve dislokasyon yoğunluğundaki değişimler gösterilmektedir. Şekil 4(a)'dan öğütmenin ilk 10 saatinde alaşımın örgü parametresinin en yüksek değeri olan 0.292 nm'ye çıktığı tespit edilmiştir. Örgü parametresindeki bu artış Al ve Cu atomlarının Fe matrisi içerisinde hızlıca çözünmesinden kaynaklanmaktadır. Örgü parametresindeki artışın diğer bir nedeni de örgü hatalarındaki (dislokasyonların) yoğunluğunun artması ve gerilme alanları üzerindeki nano tane sınırlarının neden olduğu örgü genişlemesidir [10,13,18].

Mekanik öğütmede çok yoğun çarpışmaların etkisiyle parçacıklar plastik deformasyona uğramakta ve dislokasyonlar, meydana gelen örgü kusurlarının en başlıcalarıdır. Dislokasyon yoğunluğu (ρ_D), aşağıdaki eşitlikle (Eş. 3.1) hesaplanabilir. Burada, b dislokasyonların Burgers vektörüdür (hmk yapısı için a , kristalin birim hücresi), D ortalama kristalit boyutu ve ε ortalama örgü gerinimi değerleridir. $Fe_{60}Al_{30}Cu_{10}$ tozları için hesaplanan dislokasyon yoğunlukları Şekil 4(b)'de verilmiştir. Şekilden dislokasyon yoğunluğunun (ρ_D), ilk 20 saatte hızlıca $1.96 \times 10^{16}/m^2$ değerine çıktığı, 30 saatte $2.08 \times 10^{16}/m^2$ ve 50 saatte $2.83 \times 10^{16}/m^2$ olduğu belirlenmiştir. Öğütmenin başlarında meydana gelen yoğun ve şiddetli plastik deformasyondan dolayı dislokasyon yoğunluğu değerleri hızlıca artarken, deformasyonun devam etmesiyle beraber kristaller, başlangıçta düşük açılı tane sınırları ile ayrılan alt kristallitlere bölünmekte ve dislokasyon yoğunluğunun art arda birikmesi nedeniyle 50 saatte maksimum değeri olan $2.83 \times 10^{16}/m^2$ 'ye ulaşmaktadır [17].

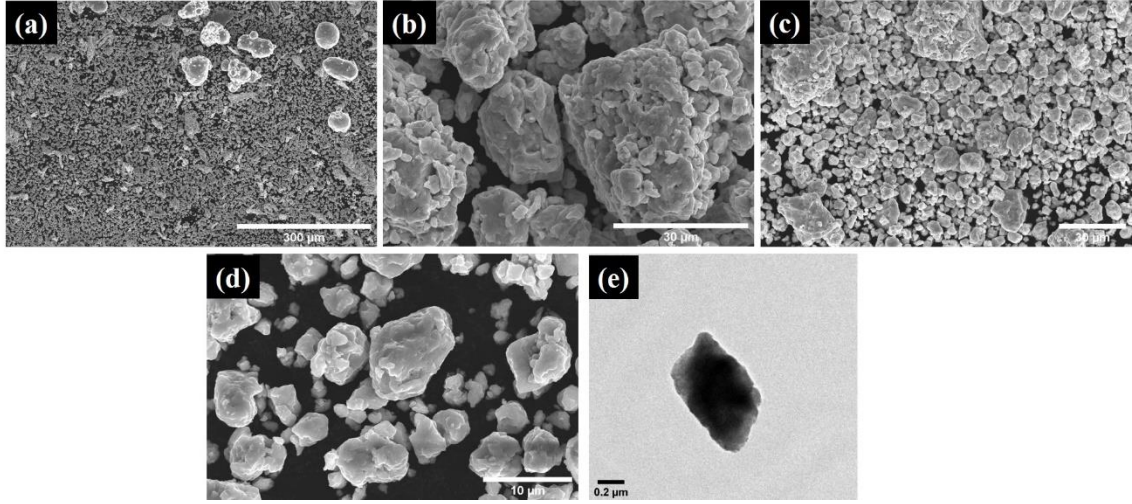
$$\rho D = 2\sqrt{3} \frac{(e^2)^{1/2}}{D.b} \quad 3.1$$



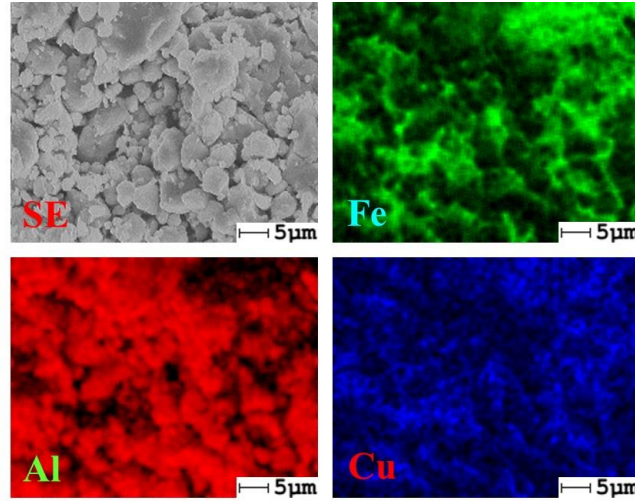
Şekil 4. Öğütme süresiyle (a) örgü parametresindeki ve (b) dislokasyon yoğunluğundaki değişim

Şekil 5(a)-(d)'de Fe-Al-Cu elementel tozlarının farklı öğütme sürelerinden (0, 10, 30 ve 50 saat) sonraki SEM morfolojileri görülmektedir. MA işlemi esnasında öğütücü hazne içerisine bilyelerle birlikte konan elementel toz karışımının bir kısmı, bilyelerin çarpması sırasında bilyeler arasında kalarak ezilir ve zamanla elementel tozların boyutu küçülmektedir. MA ile elementel tozların öğütülmesi süreci üç aşamadan oluşmaktadır: soğuk kaynaklanma, kırılma ve kararlı durum [6,19]. Şekil 5(a)'daki SEM fotoğrafında yaklaşık boyutları 3-80 μm arasında değişen Fe, Al ve Cu başlangıç elementel tozları görülmektedir. 10 saatlik öğütme sonrası bu tozlar, birbirleri ile ve bilyelerle çarpışması sonucu deformasyona uğrarlar. Yüklenen bu darbe enerjisi sebebiyle öğütmenin başlangıcında sünek olan elementel toz parçacıklarının birbirleriyle kaynaklaşarak iri taneli tabakalı bir yapı oluşturduğu gözlemlenmektedir. Bu aşamada soğuk difüzyon meydana gelmiştir ve daha büyük bir atomik yarıçapa sahip Fe, Al ve Cu'yu çözerek Fe(Al,Cu) katı çözeltili yapısı oluşmuştur. Şekil 5(b)'de görüldüğü üzere bu aşamada 10 ila 40 μm arasında değişen düzensiz şekilli ve geniş parçacıklar oluşmuştur. Devam eden deformasyonla birlikte bu katmanların ayrılmasıyla toz parçacıkları kırılıp parçalanmaya başlamış olup toz parçacıklarının boyutu yaklaşık 3-10 μm arasındadır (Şekil 5(c)). Bu esnada toz parçacıklarda meydana gelen deformasyon sertleşmesi sonucu örgü gerinimi değerleri de artmıştır (Şekil 3). Tekrarlanan soğuk kaynaklanma nedeniyle toz parçacıklarının kırılma süreci artmış olup, devam eden öğütme süresiyle birlikte toz parçacıkları bir kırılma sürecine girmiştir. Böylece parçacıklar içindeki katmanlar arası mesafe azalırken aynı zamanda sayısı da artmıştır. Bir süre sonra parçacıkların yapısı kararlı ve başlangıç kompozisyonu açısından homojen hale dönüşmektedir. Bu

aşamada toz parçacıkların morfolojileri dar bir boyut dağılımında olma eğilimindedir. Şekil 5(d)'den görüldüğü gibi parçacıkların yaklaşık boyutları 2-8 μm arasındadır. Parçacık boyutu, MA işleminin bu son aşamasında soğuk kaynaklanma ve parçalanma süreçlerinin dengeye ulaştığı sabit bir duruma ulaşmıştır. Şekil 5(e)'deki TEM fotoğrafında 50 saatlik öğütmeye ait toz parçacığının yaklaşık ortalama çapı 500 nm civarında görülmektedir. Kristalit boyutları ise XRD analizinden ~ 6 nm olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'daki $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{30}\text{Cu}_{10}$ alaşımının 50 saatlik öğütme sonrası EDX analizleri renkli haritalandırma ile yapılmıştır. Fe, Al ve Cu elementleri, haritalama analizi için belirli renklerle temsil edilmiştir. Görüntülerden Fe, Al ve Cu tozlarının birbiri içerisinde homojen olarak dağıldığı ve tek fazlı katı bir çözelti oluşturduğu anlaşılmaktadır.



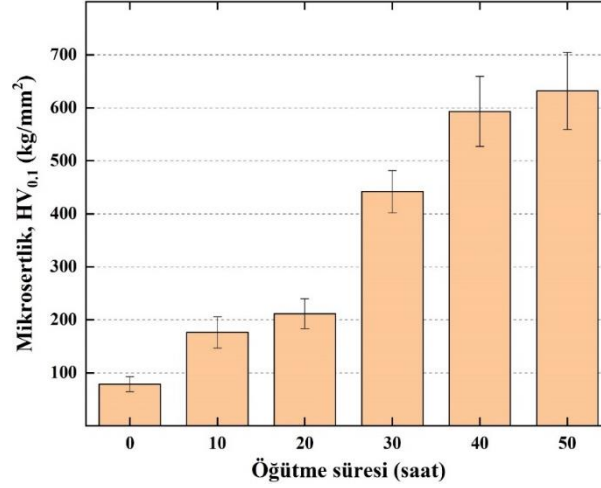
Şekil 5. $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{30}\text{Cu}_{10}$ toz parçacıklarının (a) 0 saat, (b) 10 saat, (c) 30 saat, (d) 50 saat öğütme sonrasındaki SEM görüntüleri ve (e) 50 saatlik öğütmenin TEM görüntüsü



Şekil 6. EDX analizi kullanılarak $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{30}\text{Cu}_{10}$ alaşımının 50 saatlik öğütme sonundaki elementel haritalama görüntüleri

Sertliğin malzemenin mikroyapısına olan bağlılığı, MA sürecince meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin incelenmesi için yararlı bir araçtır. Farklı kristalit boyutlardaki nanokristal tozların sertlik değerlerini ölçmek için $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{30}\text{Cu}_{10}$ tozları preslenerek pelet haline getirilmiştir. Oda sıcaklığında her bir pelet numuneden yaklaşık 5 ölçümün ortalaması alınarak, Şekil 7' de görüldüğü gibi öğütme süresince olan mikrosertlik değişimleri hesaplanmıştır. Öğütme süresinin arttırmasıyla mikrosertlik değerleri 50 saatlik öğütme süresince sürekli bir şekilde artmaktadır. MA işlemi öncesindeki toz karışımların (0 saat) sertlik değerleri yaklaşık $78 \pm 14 \text{ kg/mm}^2$ 'den 50 saatlik öğütme sonrası $632 \pm 72 \text{ kg/mm}^2$ değerine yükselmiştir.

Mikrosertlik değerlerindeki bu artışın nedeni deformasyon sertleşmesi, kristalit boyutundaki azalma ve katı çözeltilerin oluşumu gibi birçok etkiyi içermektedir [20,21]. MA süresince bilyelerin darbe etkisi sonucu oluşan plastik deformasyondan kaynaklanan deformasyon sertleşmesi ve malzemeye katılan çözünen atomların oluşturduğu katı eriyik sertleşmesi mekanizmaları alaşımın sertliğini arttırmaktadır. Ayrıca, artan öğütme süresince kristalit boyutundaki azalmayla beraber gerilme enerjisinin birikmesi de (Şekil 3) sertlikteki artışa yol açmaktadır. Bahsedilen tüm bu faktörler dislokasyon hareketini engeller ve malzemenin daha sert ve daha yüksek dayanımlı olmasını sağlar.



Şekil 7. Farklı öğütme süresinden sonraki tozların mikrosertliğindeki değişim

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Fe₆₀Al₃₀Cu₁₀ (at.%) kompozisyonuna sahip toz karışımların MA tekniği ile sentezlenmesi sonucunda nanokristal Fe(Al,Cu) katı çözeltileri elde edilmiştir. Öğütme işleminin başlarında Al ve Cu atomlarının Fe matrisi içerisinde hızlıca çözünmesinden dolayı örgü parametresi değerleri 0.292 nm'ye artmış, ilerleyen öğütme işlemi ile kararlı yapının oluşmasından dolayı azalmıştır. 50 saatlik öğütme sonunda alaşımların kristalit boyutu yaklaşık 6 nm olarak bulunmuştur. Örgü gerinimi değerleri ise öğütme süresince artan dislokasyon miktarından dolayı öğütme sonunda % 1.25'e ulaşmıştır. MA işlemi süresince maksimum dislokasyon yoğunluğu değeri $2.83 \times 10^{16}/m^2$ olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte öğütme süresince alaşımların mikrosertlik değerleri deformasyon sertleşmesi, kristalit boyutundaki azalma ve katı çözeltilerin oluşumu gibi etkilerden dolayı öğütme sonunda $632 \pm 72 \text{ kg/mm}^2$ değerine yükselmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi BAP 2015-73338635-01 no'lu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Inoue, A., Kimura, H. Bulk amorphous, nanocrystalline and nanoquasicrystalline aluminium alloys. Aerospace Materials (Editörler: Brian Cantor , Patrick Grant , and Hazel Assender). Institute of Physics Publishing, London, UK. s.150-169. (2001).
- [2] C. Suryanarayana, A. Inoue, Bulk Metallic Glasses. CRC Press - Taylor & Francis Group, USA. (2011) 1-542.
- [3] C.C. Koch, Structural nanocrystalline materials: an overview. Journal of Materials Science, 42 (2007) 1403-1414.
- [4] R.W. Siegel, G.E. Fougere, Mechanical properties of nanocrystalline materials. Nanostructured Materials, 6 (1995) 205–216.

- [5] M.A Willard, M. Daniil, Nanocrystalline soft magnetic alloys two decades of progress. *Handbook of Magnetic Materials*, 21 (2013) 173-342.
- [6] C. Suryanarayana, Mechanical alloying and milling, *Progress in Materials Science*. 46 (2001) 1–184.
- [7] S. Enzo, R. Frattini, R. Gupta, X-ray powder diffraction and Mossbauer study of nanocrystalline Fe-Al prepared by mechanical alloying. *Acta Materialia*, 44 (1996) 3105-3113.
- [8] E.P. Yelsukov, G.A. Dorofeev, Mechanical alloying in binary Fe-M (M=C, B, Al, Si, Ge, Sn) systems. *Journal of Materials Science*, 39 (2004) 5071-5079.
- [9] Q. Zeng, I. Baker, Magnetic properties and thermal ordering of mechanically alloyed Fe-40 at.% Al. *Intermetallics*, 14 (2006) 396-405.
- [10] B. Avar, M. Gogebakan, S. Ozcan, S. Kerli, Structural, Mechanical and magnetic properties of Fe – 40-at.% Al powders during mechanical alloying. *Journal of the Korean Physical Society*, 65:5 (2014), 664-670.
- [11] J. Eckert, J.C. Holzer, W.L. Johnson, Thermal stability and grain growth behavior of mechanically alloyed nanocrystalline Fe-Cu alloys. *Journal of Applied Physics*, 73: (1993) 131.
- [12] M. Krifa, M. Mhadhbi, L. Escoda, J. Saurina, J.J. Suñol, N. Llorca-Isern, C. Artieda-Guzmán, M. Khitouni, Phase transformations during mechanical alloying of Fe–30% Al–20% Cu. *Powder Technology*, 246 (2013) 117-124.
- [13] M. Krifa, M. Mhadhbi, L. Escoda, J.M. Guell, J.J. Suñol, N. Llorca-Isern, C. Artieda-Guzmán, M. Khitouni, Nanocrystalline (Fe₆₀Al₄₀)₈₀Cu₂₀ alloy prepared by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 554 (2013): 51-58.
- [14] R.A. Rastabi, A. Ghasemi, M. Tavoosi, T. Sodaee, Magnetic characterization of nanocrystalline Fe_{80-x}Cr_xCo₂₀ (15≤x≤35) alloys during milling and subsequent annealing, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 416 (2016) 174.
- [15] R. A Rastabi, A. Ghasemi, M. Tavoosi, M. Ramazani, Magnetic features of Fe-Cr-Co alloys with tailoring chromium content fabricated by spark plasma sintering, *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 426 (2017) 744.
- [16] A.H. Bahrami , H. Ghayour S. Sharafi, Evolution of microstructural and magnetic properties of mechanically alloyed Fe_{80-x}Ni₂₀Si_x nanostructured powders, *Powder Technology*, 249 (2013) 7–14.
- [17] M. S. El-Eskandarany, *Mechanical Alloying: Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy*, second ed. Elsevier, Oxford, 2015.
- [18] M. Mhadhbi, M. Khitouni, L. Escoda, J.J. Suñol, M. Dammak, Characterization of mechanically alloyed nanocrystalline Fe(Al): crystallite size and dislocation density, *Journal of Nanomaterials*, 2010 (2010) Article ID 712407.
- [19] J.S. Benjamin, T.E. Volin, The mechanism of mechanical alloying. *Metallurgical Transactions*, 5:8 (1974) 1929-1934.
- [20] M. Rafiei, M. H. Enayati, F. Karimzadeh, The effect of Ti addition on alloying and formation of nanocrystalline structure in Fe–Al system. *Journal of Material Science*, 45:15 (2010) 4058-4062.
- [21] S. Arunkumar, P. Kumaravel, C. Velmurugan, V. Senthilkumar, Microstructures and mechanical properties of nanocrystalline NiTi intermetallics formed by mechanosynthesis. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 25:1 (2018): 80-87.



Mikro Şebeke Sistemlerine Dayalı Elektrik Piyasasında Fiyat Oluşturulma Senaryosu

Mehmet Rıda Tür^{1,*}

¹Mardin Artuklu Üniversitesi, Midyat MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 47500, Midyat / Mardin

Öz

Mikro şebeke piyasasını rekabetçi bir hale getirmek için çoklu güç üretici sağlayıcıları da düşünülebilir. Rekabetçi elektrik piyasasının asıl amacı, tüketicilere en uygun fiyatlarda enerji sağlamaktır. Bu çalışmanın temel amacı, rekabetçi elektrik piyasasında Mikro şebeke enerjisinin fiyatlandırma mekanizmasını farklı enerji kaynakları kullanılarak analiz etmek ve sunmaktır. Mikro şebekenin merkezi kontrolörü, pazardaki sistem marjinal fiyatı (SMF) ve piyasa takas fiyatının (PTF) oluşması için ihaleye katılımı gerçekleşen tüm enerji yönetim sistemi faaliyetlerinin arkasındaki ana denetimdir. Bu makalede, fiyat oluşturmada iki önemli pazar uzlaştırma tekniği- Gün öncesi ve Gün içi piyasası- kısaca tartışılmıştır. Ayrıca, PV ve rüzgar gücünün pazarlanması için kısa bir kılavuz sunularak, yenilenebilir DEK'lerin Pazar fiyatlandırmasında stratejileri dikkate alınmıştır. Mikroşebeke sistemindeki tüketiciler, öncelikleri gereği, atılabilir veya zorunlu yük olarak sınıflandırılarak bu yüklerin talep eğrisini nasıl etkilediği de tartışılmıştır. Böylece, talep ve arz yönlü teklif stratejilerine dayalı olarak fiyat teklifi konusunda bir durum çalışması incelemesi sunularak, mikro şebeke kapsamında enerji yönetimi, fiyat volatilitesi ve yük alma-yük atma talimatlarının fiyatlandırma üzerindeki etkileri de tartışılmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 24/10/2018

Düzeltilme: 13/01/2019

Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Mikro şebekeler
Dağıtık enerji kaynakları
Sistem marjinal fiyatı
Piyasa takas fiyatı
Gün içi piyasası
Gün öncesi piyasası

Keywords

Micro grids
Distributed energy
resources
System marginal price
Market clearing Price
Day-time market
Day-ahead market

The scenario of price creation in the electricity market based on micro-grid systems

Abstract

Multiple power generator providers can be considered to make the micro grid market competitive. The main reason for the competitive electricity market is to provide consumers with the most affordable prices. The main objective of this study is to analyze and present the pricing mechanism of micro grid energy in the competitive electricity market by using different energy sources. The central controller of the micro grid is the main control behind all the energy management system activities that participate in the tender for the system marginal price (SMP) and the market clearing price (MCP). In this article, two important market reconciliation techniques in price creation - Day ahead and Balancing Power Market - are briefly discussed. In addition, a brief guideline for the marketing of PV and wind power was taken into consideration and strategies of renewable DERs in market pricing were taken into consideration. Consumers in the microcirculation system are classified as shed-able and non-shed-able load, and this has been discussed as how they affect the demand curve. Thus, a case study review on the price offer was presented based on the demand and supply-side bid strategies, and the effects of energy management, price volatility and down-up load instructions on pricing were also discussed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

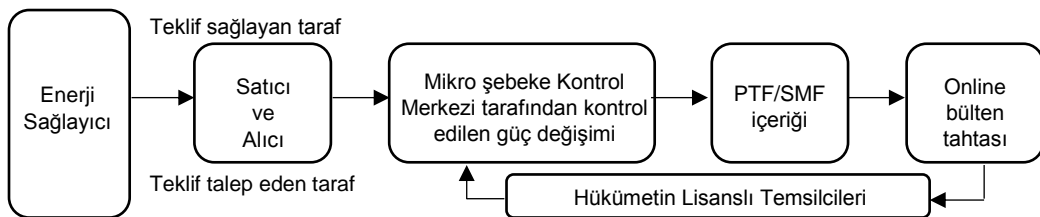
Yeniden yapılanmanın elektrik enerjisi sektörüne girmesiyle birlikte, elektrik fiyatı güç piyasasında tüm faaliyetlerin odak noktası olmuştur [1]. Alternatif enerji kaynaklarının tasarımı ve kullanımında ele alınması gereken bir konu, bunları kullanabilen esnek şebeke sistemlerinin oluşturulmasıdır. Bunun özellikle önemli bir yönü, birçok küçük üreticiden oluşan mikro şebeke sistemlerinin oluşturulmasıdır. Tüketiciler, alternatif enerji kaynaklarından birincil enerji üretimi gibi genellikle devamlı olmadığı özel bir sistemle bir araya gelebilirler. Bir mikro şebeke, yerleşim kolonileri gibi küçük ölçekli yerel enerji

üretimini, hem yenilenebilir (küçük rüzgar ve PV gibi) hem de geleneksel olmayan kaynaklarda (mikro türbin, yakıt hücreleri, dizel jeneratör), bir yardımcı programı oluşturmak için kendi aralarında birbirine bağlı olduğu bir sistemdir. Farklı üretim kaynaklarına sahip bu küçük santraller, yerel kontrolörler yardımıyla yerel olarak yük tedarik etmektedir. Yük kontrolörleri, üretim tahminine göre üretim planlaması için kararlar alırlar. Mikro şebekeler de tamamen kendi başlarına olabilir veya daha büyük geleneksel güç şebekelerine bağlanabilir. Fakat, dağıtık enerji kaynakların (DEK) dağıtım sistemine mikro gruplar oluşturarak nüfuz etmesi, geliştirilmiş güvenilirlik, güç kalitesi ve daha az dağıtım kaybı içeren yerinde üretim avantajlarını getirmektedir [2]. DEK'lerin dağıtım sistemine entegre edilmesiyle elde edilen faydaların yanı sıra, ekonomik, ticari ve teknik zorluklar da vardır [3, 4]. Güç yönetimi ile ilgili bazı teknik zorluklar literatürde ele alınmıştır [5,6]. Mikro şebekelerin etkin yönetimi ve piyasa analizi zorlu bir görevdir ve dahil olan karmaşıklık, rüzgar ve fotovoltaik gibi ayrılmaz DG'lerin fiyatlandırması varsa bu zorluk artmaktadır [7, 8]. Piyasa fiyatlandırmasının yanı sıra Mikro şebekelerde her zaman arz-talep uyumsuzluğu sorunu vardır. Bu tür bir soruna bilinen çözümlerden biri, mikro güçlerin yedek güçle donatılmasıdır (örneğin Döner rezerv ve dizel jeneratör). Bu tür yedekleme sistemleri ile işletme ve bakım maliyetleri ve çevresel etkiler yeşil DEK'lere kıyasla önemli ölçüde yüksektir ve dolayısıyla yeşil DER'leri etkin bir şekilde kullanmak için yüksek düzeyli istihbaratın geleneksel kontrol stratejilerine dahil edilmesine özen gösterilmesi, arz ve talep arasındaki uçurumu önemli ölçüde azaltabilir. Böylece piyasaya yönelik fiyatlandırmalarda kolaylıklar oluşacaktır. PV ve rüzgar, öncelikle bir Makro şebekeye uzak uygulamalar için bir güç kaynağı olarak görülmüştür. Şebekeye bağlı uygulamalar için invertörlerin geliştirilmesi ile şebekeye bağlı PV ve rüzgârlara olan ilgi günden güne arttı [9,10]. Şebekeye bağlı PV şemalarının yararları, çevreye yönelik kaygıları, yakıt tüketiminde azalma ile bağlantılı enerji kredisi ve yeni bir teknolojiye katılma ve katkıda bulunma fırsatı olarak görülmektedir [11].

Bu analizi yaparken Mikroşebeke enerji pazarında merkezi kontroller yapılı ve PTF belirlemek üzere ihale sürecine girilir. Burada iki önemli Pazar oluşturma tekniği vardır. Bunlar; gün öncesi ve gün içi piyasasıdır. Yenilenebilir (PV ve rüzgâr jeneratörü) günlük üretiminde piyasa koşulları dikkate alınarak stratejiler belirlenir. Buradaki amaç, çeşitli tüketicilere farklı dağıtık enerji türlerini ulaştırmaktır ve tüketiciler için SMF ve PTF araştırmasını yapmaktır. Bu tüketimler atılabilir yükler ve gerekli yükler olarak sınıflandırılır. Elektrik yüklerinin bir grubunu beslemek için Küçük ölçekli enerji kaynaklarının kullanımı, elektrik enerjisi için büyüyen taleplerle artmaktadır [12].

Bir elektrik pazar sistemi, fiyat belirlemek amacıyla arz ve talebi kullanarak elektrik alış satışı işlemi gerçekleştirir. Elektrik birim fiyatını düşürmek için rekabetçi elektrik pazarlarını oluşturmak her zaman için ilk seçenektir. Mikro şebekeler yerel pazarlarda mevcuttur ve genellikle orta ölçekli ticari tüketicilere hizmet eder onların isteklerine cevap verirler. Piyasadaki müşteriler her zaman bu fiyatlandırma mekanizmasına katkıda bulunacak maddi teşviklere sahip değildir. Bu eksiklikten dolayı birçok elektrik piyasası modeli makul kararlar alabilecek gerçek talepleri olan tüketiciler gibi davranamazlar, fakat bu tüketiciler sadece bütün şartlar altında karşılanması gereken bir yük olarak görülürler. Bu pazardaki aktif katılım (talep eden tarafların aktif katılımı) hala minimum düzeydedir.

Bu çalışmanın asıl amacı, çeşitli tüketicilere farklı dağıtık enerji türlerini ulaştırmaktır ve tüketiciler için SMF ve PTF araştırmasını yapmaktır. Bu tüketimler atılabilir yükler ve gerekli yükler olarak sınıflandırılır. Beş farklı üretim teklifi düşünülmektedir, 1.Teklif: Rüzgâr jeneratörü, 2.Teklif: Güneş PV, 3.Teklif: Mikro türbin, 4.Teklif: Yakıt hücresi ve 5.Teklif: Dizel jeneratörü. Teklif 1-2 yenilenebilir enerji, teklif 3-5 ise BIG sistemleridir. Bu modelde hem arz eden hem de talep eden taraf önemli rol oynamaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, elektrik piyasasında genellikle iki önemli Pazar oluşturma tekniği benimsenmiştir, bu teknikler sırasıyla gün öncesi ve gün içi piyasasıdır.



Şekil 1. Teklif edilen Mikroşebeke pazar modelini ticari yapısı

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Mikro Şebekelerde Fiyatlandırma Senaryosunun Oluşturulması (The Creation of Pricing Scenarios in Micro Grids)

Mikroşebeke araştırmada iki önemli alan vardır. Bunlar; teknik ve ekonomik alanlardır. Teknik araştırmalar ana şebeke ve Mikroşebeke ara yüz programları, gerilim ve frekans regülasyon yanı sıra, aktif ve reaktif güç kontrolü ve çeşitli diğer teknik konular ile ilgili sorunları inceliyor. Ekonomik yönden değerlendirme; pazar yapısı, iş modeli ve enerji piyasası gibi konuları içermektedir [13, 14]. Bu çalışmada enerji piyasasında fiyatlandırma üzerinde analizler yapılmaktadır.

Her şeyden önce bir Mikro şebeke uygulanması maliyetine DEK maliyeti dâhildir dağıtık enerji (DE) ve depolama gibi. İkinci yatırım güç elektroniği cihazlarının fiyatıdır, örneğin; farklı tip dönüştürücüler. Ayrıca, gerekli ekipmanların diğer birçok parçaları vardır, bunlar; koruma cihazları, haberleşme bağlantıları ve temek güç sistemleridir. Nihai yatırım maliyeti, Mikroşebeke uygulama sonrasında ortaya çıkan bakım ve işletme maliyetidir. Yukarıdaki tüm maliyetlerin toplamı müşteri tarafından ödenen ücret gibi sistemin fiyatıdır, böylece bu maliyetlerin optimize etmek gereklidir. Bir Mikroşebeke sisteminin bu maliyetleri üç farklı kategoride değerlendirilir [15].

- DEK işletme maliyetleri (Yakıt maliyetleri, kontrol ve bakım maliyetlerini içerir)
- DEK sermaye maliyetleri (DE ve diğer gerekli cihazların kurulumu maliyetlerini içerir)
- Elektrik Ücretleri (Mikroşebeke ana şebekeden elektrik satın alınca tüketiciler tarafından ödemeler)

Mikro şebekeler, yardımcı hizmet piyasaları gibi enerji piyasasında katılabilir. Çoklu madde sistemine göre Oligopolistik yöntem Mikro şebekeler için iyi bir pazar yapısıdır [16, 17]. Oligopol piyasası, genelde 2, 3 veya 4 oyuncunun (üretici, aracı veya satıcı) hakimiyetinde şekillenen piyasa. Doğal nedenlerin etkili olmadığı durumlarda çoğu piyasa oligopol piyasasına dönüşür. Zira tekel piyasasındaki büyük kâr imkânlarının çekiciliği yeni oyuncuların katılımına yol açar. Veri toplayıcılara göre Mikroşebeke ve ana şebekeye farklı bakış açıları vardır. Örneğin, Mikro şebekeden ana şebekeye enerji satışı olduğunda, bilgi toplayıcılar ana şebeke bakış açısından satıcıdır ve Mikroşebeke bakış açısından alıcıdır [18]. Son zamanlarda, enerji işlemlerini değiştirmek için birçok öneri sağlanmıştır, perakende çarkı bunlardan biridir. Bu Yöntemin ana hedefi, elektrik enerjisinin maliyeti azaltmak için bir pazar stratejisi üretmektir. Bunun basit bir açıklaması, elektrik tedarikçileri ve müşterileri işlemlerini uzaktan gerçekleştirebilmektir. Ayrıca, Mikroşebeke aracılığı fazla enerji serbest rekabet şeklinde ana şebekeye iletilir [19].

A. Sistem Marjinal Fiyatının Oluşturulması

Tüm teklif bölgeleri ve fatura dönemine yönelik oluşturulan SMF, üretim ve tüketim dengesine göre Tablo 1'de gösterilen şekilde belirlenir. İlgili saat ve bölgede enerji eksikliği olarak açık meydana geldiğinde, SMF belirlenmesi için, YAL için verilen teklif fiyatları küçükten büyüğe göre sıralanır ve en düşüğünden başlanılarak hesaplanan NTH değerine denk gelen en yüksek olarak verilen eşik olarak kabul edilir. İlgili dönemde sistemde denge durumu oluşacağına, SMF, teklif bölgesi (t) ve uzlaştırma dönemi (u) üzerinden belirlenen gün öncesi fiyatı oluşur.

Tablo 1. YAL ve YAT tekliflerine göre SMF

YAL teklifleri			YAT teklifleri		
Fiyat (TL)	Miktar(MWh)	Etiket	Fiyat (TL)	Miktar(MWh)	Etiket
102,5	25	-	47,5	25	2
97,5	125	0	45	75	2
95	150	1	42,5	50	1
92,5	125	0	40	50	2
70	75	-	35	50	2
65	100	2	25,5	50	-
62,5	50	-	20	50	1
60	75	0	17,5	25	-
57,5	100	0	7,5	30	-
55	25	0	2,5	20	-

Sistemde verilen YAL ve YAT teklif fiyatları baz alınarak yapılan belirleme işlemde sırasıyla;

- Enerji açığı oluştuğunda en düşükten en yükseğe doğru,
- Enerji fazlalığı oluştuğunda en yüksekten en düşüğe doğru

olmak üzere DGP kontrolünde yapılan sıralamada NTH değerine denk gelen tutar SMF olarak kabul edilir. Tablo 1’de gösterildiği gibi SMF 70 TL olarak belirlenir.

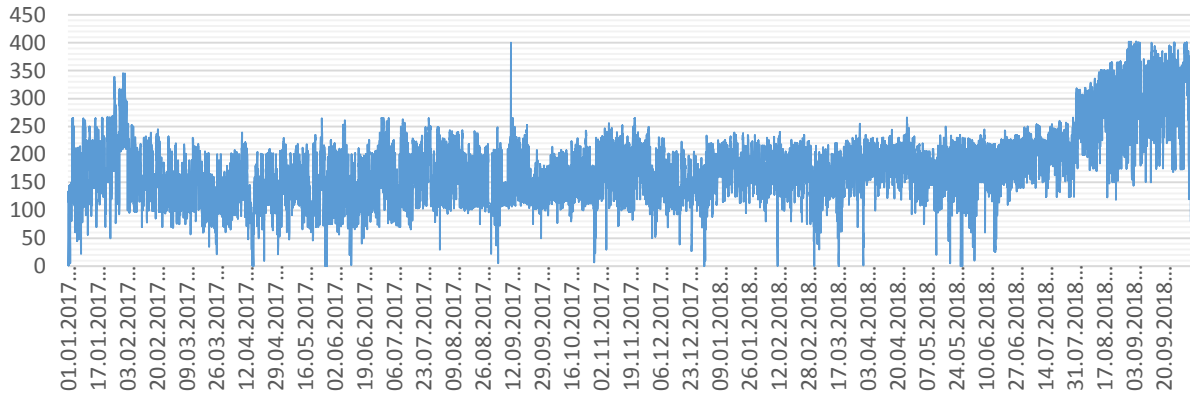
Tablo 1’den elde edilen sonuçlara göre;

0-Kodlu YAT değeri 0 MW, YAL değeri 450 MW, NET ise 400 MW’dır.

1-Kodlu YAT değeri 100 kW, YAL değeri 150 MW, NET ise 0 MW’dır.

2-Kodlu YAT değeri 200 MW, YAL değeri 100 MW, NET ise 0 MW’dır.

Piyasa için net hacim baz alınarak verilen fiyat teklifleri ile SMF’nın belirlendiği ve buna göre sistemin gerçek yönünün oluştuğu görülmektedir. Çalışmanın yapılması ve sonuca varılması için yapılan deney/gözlem ve uğraşların tamamının belirtildiği kısımdır. 1 Ocak 2017 tarihinden itibaren ulusal güç sistemimiz için elde edilen SMF TL/MWh cinsinden değeri Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 2017-2018 tarihleri arasında hesaplanan SMF değişimi

B.Piyasa Takas Fiyatının Oluşturulması

Elektrik piyasasında iki önemli fiyatlandırma kuralı vardır. Bunlardan ikisi de genelde gerçek zamanlı piyasada kullanılır:

- 1- Tek fiyatın olduğu piyasa kuralları
- 2- Ayırıcı ihale piyasası kuralları

İlki elektrik piyasasında çok yaygındır. Bu süreçte satıcılar kendi elektrikleri için PTF alırlar, hatta bu fiyat bütün tüketicilerin PTF için ödeyeceği fiyattan ya daha azdır ya da daha fazladır. Bütün tüketicilerin PTF için ödeyeceği fiyattan daha az ya da daha fazla ödeseler bile, bu süreçte satıcılar kendi elektrikleri için PTF alırlar. Böyle bir sisteminin arkasındaki teori şudur: elektriği satmak için verilen bütün teklifler bu elektriğin en ucuz maliyetinde fiyatlandırılır. İkinci kurala gelince bu ihaleyi alan her katılımcı ihale ücretini öder. Bu sistemde, ihale en düşük fiyatı tahmin ederek yapılır ve bu en ucuz maliyete dayalı değildir. Bu tahmin saatlik ihalelerin sonuçlarını takip ederek günde 24 defa olarak yapılır. Bu sürecin dezavantajı fiyatı düşük veren firmalar yanlış olarak tahmin ederek en düşük fiyattan daha yüksek bir fiyat verebilir. Böylece yüksek fiyat veren firmalar işi alacak diğer firmalar boşta kalacak. Böylelikle enerjinin maliyeti ortalama Pazar fiyatının üzerinde olacak. İhale ile ödeme sistemi elektrik üretiminin toplam maliyetini arttırabilir ve bunun sonucu olarak da Piyasa denge fiyatı sisteminde daha az etkin olacaktır. Enerji sektöründe serbestleşmenin ortaya çıkması ile birlikte bu fiyatlandırma sisteminin uygulanması doğal bir süreç haline dönüşür. Çünkü ihale usulü ile yapılan tekliflerde gerçek fiyatın ortaya çıktığına inanılır.

PTF talep ve arz arasındaki en düşük fiyatı elde etmektir. Bu fiyatta hem üreticiler hem de tüketiciler tatmin olur ve kabul edilen ihale fiyatı üzerinden yeterli miktardaki enerji tüketicilere sağlanır. İhale satış fiyatları genellikle en düşük fiyattan en yüksek fiyata göre düzenlenir. Bunun aksine satın alma fiyatı ise en yüksekten en düşük fiyata doğru düzenlenir. PTF içerisinde toplam satış ihale fiyatları toplam ihale alışı fiyatlarına denk olur. Bir piyasada arz talep teklifleri benzerdir. Bu bölüm, doğrusal tekliflerde rekabet piyasasındaki PTF 'nin detaylı bir analizi sunmaktadır. Talep cevabını şöyle tanımlanır; zamanla elektrik fiyatındaki değişikliklere cevap olarak normal tüketim modellerinden son kullanıcı müşterilere kadar elektrik kullanımında görülen değişikliklerdir, ayrıca yüksek toptan piyasa fiyatlarının olduğu zamanlarda veya sistem güvenliği tehlikedeysen düşük elektrik kullanımını teşvik için tasarlanmış programlardır. DE, teşvik-tabanlı programlar ve zaman-tabanlı programlar olmak üzere iki temel kategori ve çeşitli alt gruplara ayrılmıştır.

Teşvik tabanlı DE programları genellikle endüstriyel tüketiciler için daha uygundur. Teşvik merkezli DE sözleşmeleri, normalde dağıtım programı ve büyük tüketicilere arasında vardır ve bu programların çoğu ağda sıkışıklığı azaltmak için ve enerji belirtilen düzeyine göre ayarlayıp tüketicilerin yükünü azaltıcı bir görev içerir [20].

C. Tek taraflı ihale piyasası

Bu piyasada tedarikçi şirketler ihaleye katılır ve tüketicilerin talebi piyasadaki fiyatlara bakılmaksızın ele alınır. Bu piyasa BIG jeneratörleri, yenilenebilir ve dizel destekli jeneratörlerden oluşmaktadır. Dizel jeneratörler genellikle destek olarak kullanılır, fakat kıyaslamak amacıyla ana jeneratör olarak ele alınmaktadır.

Şimdi $Q_1(p)$ kW değeri Teklif 3 tarafından p_{TL} / kWh olarak üretilirse arz eğrisi şu şekilde ifade edilir.

$$Q_1(p) = \frac{p}{m_{s1}} = Q_{1slec} + Q_{1Th} \quad (1)$$

Burada, Q_{1slec} mikro türbin tarafından üretilen elektrik kW'dir. Q_{1Th} ise mikro türbin tarafından üretilen termal enerjidir, ki buda joul sabitini kullanarak elektrik yüküne çevrilir ve m_{s1} Teklif 3'in doğrusal arz eğrisinin açısıdır. Benzer bir şekilde, $Q_2(p)$ kW değeri Teklif 4 tarafından p_{TL} / kWh olarak üretilirse arz eğrisi şu şekilde ifade edilir.

$$Q_2(p) = \frac{p}{m_{s2}} = Q_{2slec} + Q_{2Th} \quad (2)$$

Burada, Q_{2slec} yakıt hücresi sistemi tarafından üretilen elektrik kW'dir. Q_{2Th} ise yakıt hücresi tarafından üretilen termal enerjidir, ki buda joul sabitini kullanarak elektrik yüküne çevrilir, ve m_{s2} Teklif 4'in doğrusal arz eğrisine bağlıdır.

Aynı şekilde N tekliflerinin kombine arz eğrisi aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$Q(p) = Q_1(p) + Q_2(p) + \dots + Q_N(p) \quad (3)$$

$$= \frac{p}{m_{s1}} + \frac{p}{m_{s2}} + \dots + \frac{p}{m_{sN}} \quad p \sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{sj}}$$

PTF için (p^*) Talep, T 'de sabitlenirse: $Q(p^*) = T$ veya $T = p^* \sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{sj}}$

Böylece,

$$p^* = \frac{T}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{sj}}} \quad (4)$$

(4)'te teklifçilerin yeterli üretim kapasitelerinde olduğu varsayılır. Eğer kapasite limiti ki buda minimum üretimde Q_{min} ile maksimum üretim Q_{max} arasındadır, belirlenirse o zaman bileşik arz eğrisi (3) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q(p) = p \sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{sj}} [U(Q - Q_{min}) - U(Q - Q_{max})] \quad (5)$$

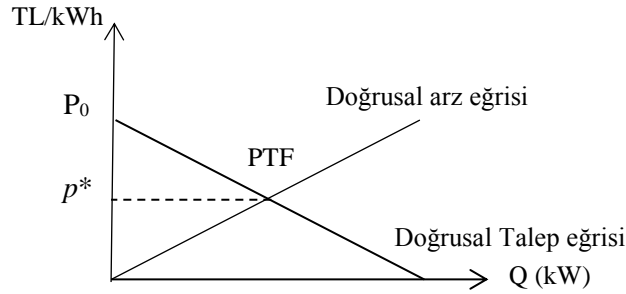
(5) için Talebi ' T ' ile dengelediğimizde, PTF (p^*) belirlenebilir.

D. Çift Taraflı İhale Piyasası

Bu piyasada, talep eğrisinin esnekliği hesaplanmıştır. Hem arz hem de talep eden tarafın verdiği teklifler denge fiyatını belirlemek için dikkate alınır. Fiyata bağlı hem doğrusal arz hem de talep değişkenleri analizde hesaplanmıştır. $T(p)$ 'yi, piyasa katılan tüketici sayılarının tekliflerinden elde edilen bileşik talep fiyatı (pTL/kWh) olarak belirleyelim, $T(p)$ aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D(p) = \sum_{j=1}^N \frac{Po}{m_{dj}} - \sum_{j=1}^N \frac{P}{m_{dj}} \quad (6)$$

Şekil 3'de Doğrusal arz ve talep eğrisi gösterilmektedir. Burada p^* talep eğrisinin çıkışma noktasıdır ve buda tüketicinin türüne göre değişir. Eğer belirli bir fiyatta ise (p), $T(p)$ tüm katılan tüketiciler için toplam



Şekil 3. Doğrusal arz ve Talep eğrisine göre PTF

talep olarak hesaplanır:

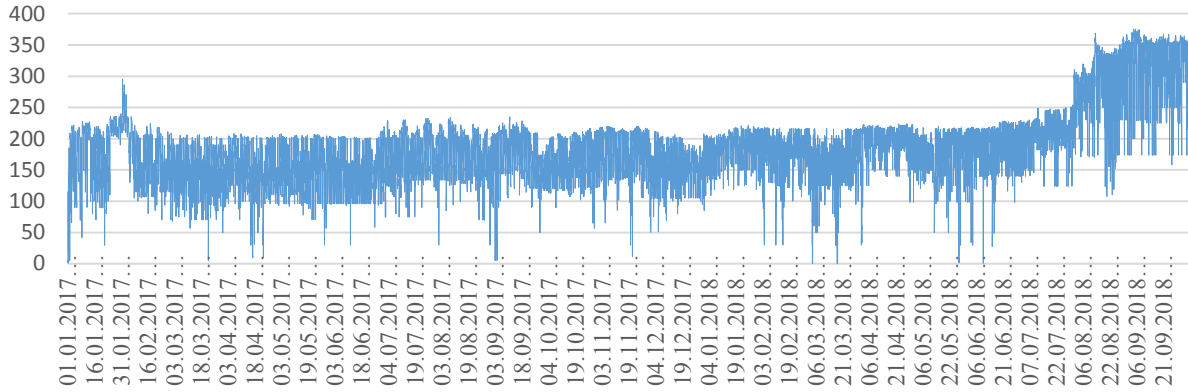
$$D(p) = \sum_{j=1}^N \frac{Po}{m_{dj}} - p \sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{dj}} \quad (7)$$

PTF için (p^*)

$$p^* \sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{sj}} = \sum_{j=1}^N \frac{Po}{m_{dj}} - p^* \sum_{j=1}^N \frac{1}{m_{dj}} \quad (8)$$

Böylece, PTF aşağıdaki ifade ile hesaplanır,

$$p^* = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{Po}{m_{dj}}}{\sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{m_{sj}} + \frac{1}{m_{dj}} \right)} \quad (9)$$



Şekil 4. 2017-2018 tarihleri arasında hesaplanan PTF değişimi

3. BULGULAR (RESULTS)

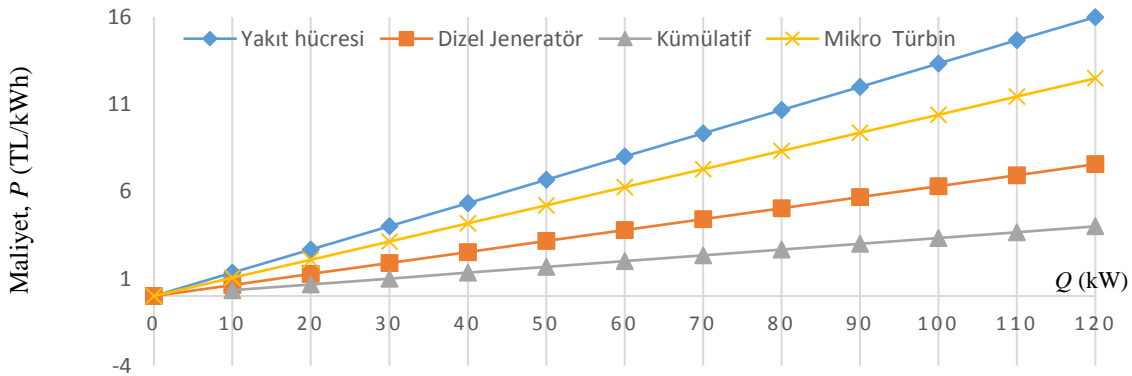
Düşünülen Mikroşebeke sistemi, 1.Teklif: Rüzgâr jeneratörü, 2.Teklif: Güneş PV, 3.Teklif: Mikro türbin, 4.Teklif: Yakıt hücresi ve 5.Teklif: Dizel jeneratörü üreticileri içerir. Bu Teklifler hakkındaki parametreler Tablo 2’de gösterilmektedir.

Durum 1: Sabit talep ile doğrusal arz teklifleri (tek taraflı teklif piyasası)

(1) Bu durumda, 80 kW sabit bir talep olarak kabul edilir. Analiz aşağıdaki durumlar için gerçekleştirilir: Yenilenebilir jeneratörler kullanılmaz olarak kabul edilir. Talep sadece BIG (Teklif 1 ve 2) jeneratörleri ve dizel jeneratörleri (Teklif 3) tarafından karşılanmaktadır. Teklif 1,2, ve 3 için bireysel ve kümülatif arz eğrileri Şekil 5’te gösterilmiştir.

Tablo 2: Durum çalışmasında kullanılan teklif parametreleri

Üreticiler	m_S (TL/kWh)	Q_{gmax} (kW)	Q_{gmin} (kW)
Teklif 4 (Rüzgâr Jeneratörü)	0.27	10	0
Teklif 5 (Güneş PV)	0.4756	20	0
Teklif 1 (Mikro türbini)	0.1056	30	Termal yükü sağlayan min. güç
Teklif 2 (Yakıt Hücresi)	0.1386	50	D_0
Teklif 3 (Dizel Jeneratörü)	0.063	60	0



Şekil 5. Teklif 1,2 ve 3 için bireysel ve kombine arz eğrisi.

PTF kümülatif arz eğrisi ile $Q=80$ kW değerinde çizilen dikey çizgisinin kesişim noktasından elde edilir. Bu durum için, $PTF=2,5$ TL/kWh olur. 80 kW talebi karşılamak için her jeneratör tarafından sağlanan güç Tablo 3’de gösterilir.

(2) Bu durumda, yenilenebilir jeneratörlerin üretimi 30 kW olarak kabul edilir ve teklif sürecine katılmazlar. Ayrıca hem rüzgâr hem de FV üretiminin gündüz boyunca kullanılabilir olduğu düşünülmektedir, bu durum sadece Teklif 1,2 ve 3 için toplam yüklemeyi 80 kW ‘tan 50 kW ‘a düşürür. Bu takdirde, PTF kümülatif

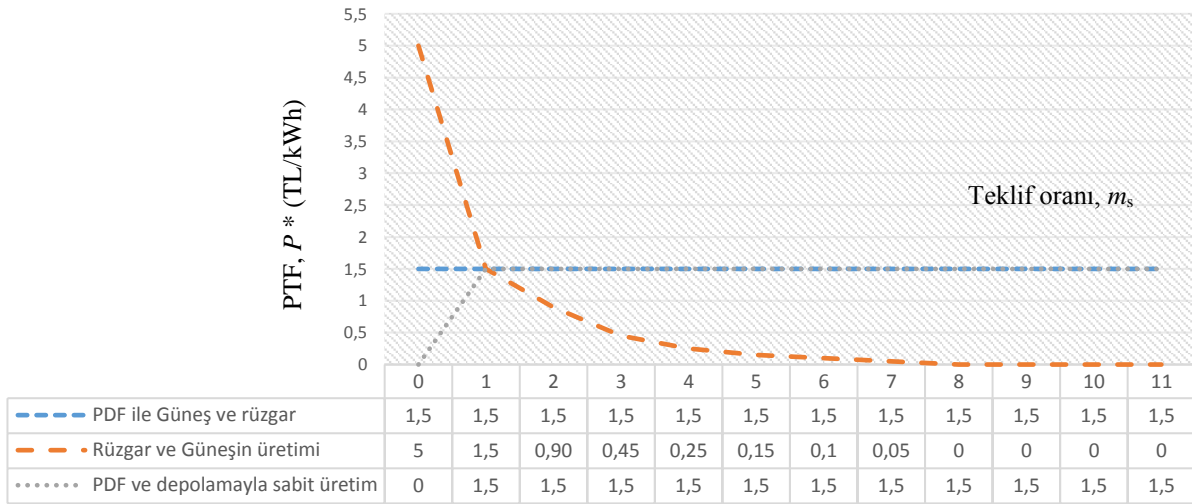
arz eğrisi ve $Q=50\text{kW}$ değerinde çizilen dikey çizgisinin kesişimin noktasından elde edilir. Bu durum için, $\text{PTF}=1,5\text{TL/kWh}$ olur. PTF düşürüldüğü için yenilenebilir enerjinin maliyetini kurtarmak mümkün olmayabilir ve ayrıca yenilenebilir enerjinin kullanılmaz olduğu süreçte aşırı maliyet oluşur. Böylece PTF $1,5\text{TL/kWh}$ olarak sabit olmalıdır. Ancak aşağıda gösterildiği gibi teklifçilerin üretimi azalacaktır

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta p}{m_{sj}} \quad (10)$$

Tablo 3: Teklif arzı için sunulan üretim miktarı ve tutarı

Üreticiler	Üretici Üretimi (kW)	Ücret (TL)	Oran (TL/kWh)
Teklif 1 (Mikro türbini)	12,0	30	2,5
Teklif 2 (Yakıt Hücresi)	9,0	22,5	2,5
Teklif 3 (Dizel Jeneratörü)	24,0	60	2,5
Toplam	40,0	112,5	

(3) Bu durumda, yenilenebilir enerjinin teklif etkisi incelenmiştir. Hem rüzgâr hem de FV üretimi belirsizdir. Rüzgâr ve güneş panelleri ile birlikte PTF farklı teklif oranları (m_s) ile üretim varyasyonu Şekil 6’te gösterilmiştir, yani (i) sınırlı yenilenebilir enerji ve (ii) sınırsız yenilenebilir enerji. Sınırlı yenilenebilir enerji: Eğer yenilenebilir enerjinin teklifi $m_s=0$ ise, bu tamamen yüklenecek ve PTF $1,5\text{TL/kWh}$ olacaktır. Sınırlı yenilenebilir enerji üretimi Mikro şebekede depolama imkânından dolayı mümkündür.



Şekil 6. Talep sabit iken PTF ve üretime karşı teklif oranı eğrileri

Sınırsız yenilenebilir enerji: $m_s=1$ olduğunda PTF değeri sınırlı yenilenebilir enerji (örneğin 30kW) ile sınırsız yenilenebilir enerji için aynıdır. PTF için maksimum ve minimum değeri m_s 'ye göre kısmi türev alınarak (4) ile hesaplanabilir ve sonra sıfıra eşitlenir. Tablo 4'te 0 ile 10 arasında değişen m_s farklı değerlerine göre aşağıdaki iki seçenek için ödeme ve üretimi gösterir:

- (1) **Tercih 1:** 30 kW sabit yenilenebilir enerji üretimiyle, $m_s < 1$ olduğu zaman $\text{PTF}=1,5\text{TL/kWh}$
- (2) **Tercih 2:** m_s 1 ile 10 arasından olduğu zaman, PTF yenilenebilir enerji ve Teklif 1,2 ve 3 üretimi ile hesaplanır

Tablo 4. Teklifçilerin ödeme ve üretimi

Üreticiler	Üretim (kWh) ($m_s < 1$)	Ücret (TL) Tercih 1	Üretim (kW) $1 < m_s < 10$	Ücret (TL) Tercih 2
Teklif 1 (Mikro türbini)	7	10,5	7	16,8
Teklif 2 (Yakıt Hücresi)	6	9	6	14,4
Teklif 3 (Dizel Jeneratörü)	12	18	22	28,6
Yenilenebilirler	15	22,5	15	36
Toplam	40	60	40	91

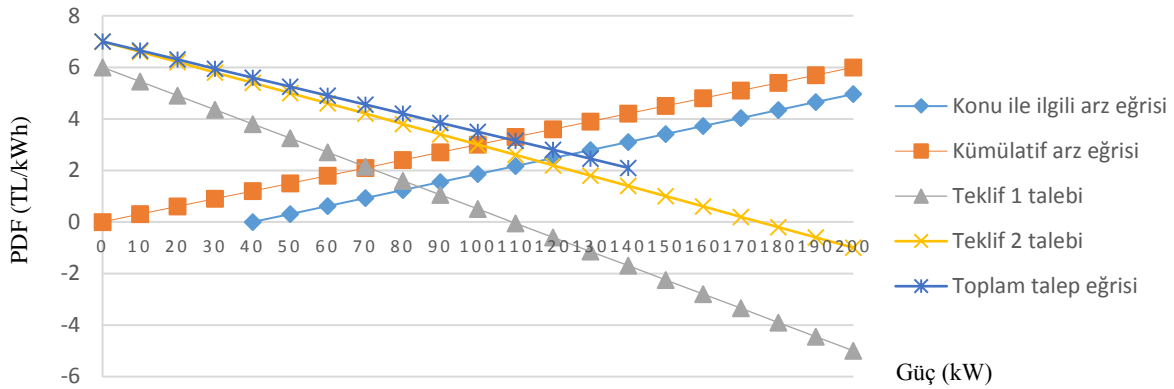
Durum 2: Doğrusal talep teklifi ile doğrusal arz teklifi (çift taraflı teklif piyasası)

Bu durumda, Şekil 7’te gösterildiği gibi iki tüketicinin ihale katıldığı kabul edilir. Tüketicilerin Teklif verileri Tablo 5’de verilmiştir. Talep için doğrusal teklif veri kabul edilmiştir. PTF, arz ve talep eğrilerinin kesiştiği noktada hesaplanır ve 3,4TL/kWh olarak tespit edilmiştir. Bireysel tüketicilerden gelen talep Şekil 7’den elde edilir. Kullanılmış veriler:

Teklif 1 talebi = 64 kW, Teklif 2 talebi = 46 kW, Toplam talep = 110W

Üretim sağlayıcıları Şekil 5 ve 7’de gösterildiği gibi tarifeye uygun olarak enerjiyi sağlayarak bu talebi karşılar:

Teklif 1 (mikro türbin) = 33 kW, Teklif 2 (Yakıt hücresi) = 26 kW, Teklif 3 (Dizel jeneratör) = 51 kW, Toplam üretim =110 kW



Şekil 7. Arz (kümülatif) ve talep (bireysel ve kümülatif) eğriler

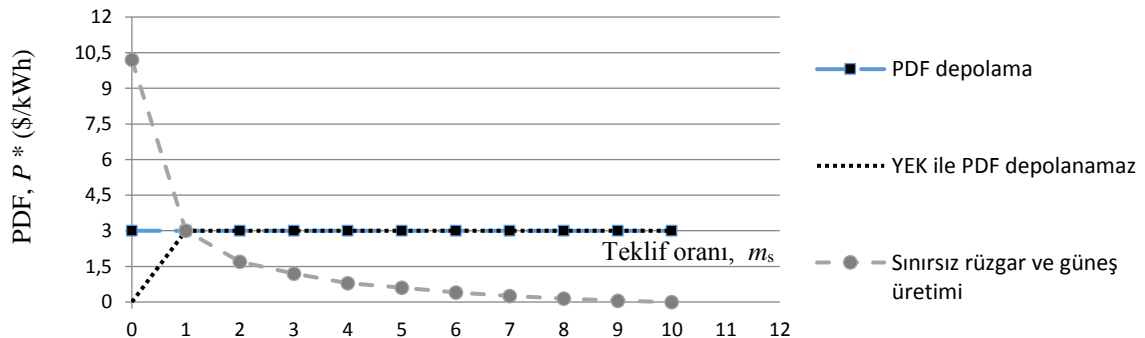
Tablo 5. Doğrusal teklif bilgisi

Tüketiciler	m_{dj} (TL/kWh/kW)	p_0 (TL/kWh)
Teklif 1 (Mikro türbini)	0.041	6.0
Teklif 2 (Yakıt Hücresi)	0.077	7.0

Eğer yenilenebilir enerji ihale sürecine katılmıyorsa, 30 kW olan bunların katkıları PTF 3TL/kWh için azalacak ve tüketicilerin tüketimi artacak. Teklif 1 = 72 kW, Teklif 2 = 52 kW, Toplam Talep = 127 kW

Şekil 7’den, yenilenebilir enerjilerin temini 30 kW iken, diğer üç teklif temini aşağıdaki gibi olacaktır: Teklif 1 (mikro türbin) = 23 kW, Teklif 2 (Yakıt hücresi) = 29 kW Teklif 3 (Dizel jeneratör) = 49 kW, Toplam üretim =101 kW

Şekil 8’den, yenilenebilir enerjinin teklif oranı 1.0’den daha az olduğunda 30 kW sınırlı yenilenebilir enerjinin PTF üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Teklif oranındaki artışla birlikte PTF artış olur, fakat yenilenebilir enerjiden sevk edilen elektrik daha azdır. Tablo 5’te PTF ücretleri gösterilmektedir.



Şekil 8. Talep değişken iken PTF ve üretime karşı teklif oranı eğrileri

Tablo 5. Farklı PTF için teklif ücretleri ve üretim

Üreticiler	Yenilenebilir Enerjisiz		Yenilenebilir Enerjili	
	Güç (kWh)	Ücret (3,4TL/kWh)	Güç (kWh)	Ücret (3TL/kWh)
Arz tarafı ücreti				
Teklif 1 (Mikro türbini)	33	112.2	23	69
Teklif 2 (Yakıt Hücresi)	26	88.4	29	87
Teklif 3 (Dizel Jeneratörü)	51	173.4	49	147
Yenilenebilirler	0	-	30	90
Talep tarafı ücreti				
Teklif 1 (Mikro türbini)	64	217.6	76	228
Teklif 2 (Yakıt Hücresi)	46	156.4	55	165
Toplam ücret	110	374.0	131	393

Yenilenebilir enerjinin Tekliflere dahil edilmesi sonucunda ücretinde toplamda düşüş yaşandığı izlenmektedir. Tekliflerde yaşanan artış sonucunda PTF belirgin bir artış gerçekleşir, fakat yenilenebilir enerjiden sevk edilen elektrik daha az olduğu izlenmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Elektrik piyasası ikili anlaşmalar ve/veya elektrik borsaları yoluyla düzenlenir. Elektriğin depolanamamasından ötürü, arz ve talebin dengede tutulabilmesi için, iki taraf arasında imzalanan ve sadece bu iki tarafça bilinen, fiyatların standart olmadığı ikili anlaşmalar yapılması gerekir. Elektrik borsası ise, elektrik için bir spot piyasa oluşmasını sağlar ve bir referans fiyat oluşmasını sağlar. Ancak Mikroşebeke sistemlerinde depolama imkânlarından dolayı arz talep dengesi mümkündür. Bu durum da elektrik piyasası için oldukça önemlidir. Bu çalışma, geleneksel olmayan ve geleneksel enerji kaynaklarının çeşitli kombinasyonlarında SMF ve PTF'nin karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakların belirsiz mevcudiyeti ile ticaretin yapılacağı gerçek SMF ve PTF bulmak zorlaşmaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynakları için, bir durumda, piyasaya mevcut ve ne zaman kullanılabilir olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, bu üretim belirsizliğini ve ihaleye sorumlu katılımı yumuşatmak için depolama sistemine sahip bir durum düşünülmüştür. Hükümetin fiyat ve çevre dostu doğası ile ilgili sübvansiyonları, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı için teşvik edici olsa da, hâlâ belirsizlik, geniş çaplı kullanımlarındaki ana zorluktur. Uygun ve şeffaf ticaret uygulamaları kazan-kazan durumu yaratabilir. Bu çalışma, piyasa araştırmacılarına yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan mikro şebeke fiyatlandırma piyasası hakkında fikir sunmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S., Saroha et. al ,“Java based power trading simulator in electricity market”, International journal of computer application , volume 44 ,no. 5 april 2012.
- [2] J.M. Guerrero, F. Blaabjerg, T. Zhelev, K. Hemmes, E. Monmasson, S. Jemei, M. P. Comech, R. Granadino, and J. I. Frau, “Distributed generation: Toward a new energy paradigm,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 4, no. 1, pp. 52–64, Mar. 2010.
- [3] N. D. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, “Microgrids,” IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul. 2007
- [4] M. A. Lopez, S. Martin, J. A. Aguado, and S. de la Torre, “Marketoriented operation in microGrids using multi-agent systems,” in Proc. 2011 Int. Conf. Power Eng., Energy and Electr. Drives (POWERENG), 2011, pp. 1–6.
- [5] K. T. Tan, P. L. So, Y. C. Chu, and M. Z. Q. Chen, “Coordinated control and energy management of distributed generation inverters in a microgrid,” IEEE Trans. Power Del., vol. 28, pp. 704–713, 2013
- [6] A. Timbus, M. Larsson, and C. Yuen, “Active management of distributed energy resources using standardized communications and modern information technologies,” IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 56, no. 10, pp. 4029–4037, Oct. 2009.

- [7] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 360–370, Feb. 2010.
- [8] S. Suryanarayanan, F. Mancilla-David, J. Mitra, and Y. Li, "Achieving the smart grid through customer-driven microgrids supported by energy storage," in *Proc. 2010 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 884–890.
- [9] G. N. Bathurst, et al. "Trading wind generation in short term energy market"; *IEEE Trans. on power systems*, vol.17, no.3, pp782-789, Aug2002.
- [10] K. Khouzam, "Prospect of domestic grid connected pv systems under existing tariff conditions" 26th *IEEE pvsc*, Sept.30-oct.3, 1997
- [11] Martel, S. et al. "Avoided cost benefits of pv on diesel-electric grids", 24th *IEEE pv specialties conference proceedings*, 1994, pp 1048-1053
- [12] R. H. Lasseter, "Microgrids and distributed generation," *Journal of Energy Engineering*, vol. 133, pp. 144-149, 2007.
- [13] S. M. Omid Palizban, *Hybrid Systems Control, with Renewable Energy Sources*: German Academic Publishing, 2012.
- [14] J. Guerrero, et al., "Advanced Control Architectures for Intelligent MicroGrids, Part I: Decentralized and Hierarchical Control," 2013.
- [15] Y. Zoka, et al., "An economic evaluation for an autonomous independent network of distributed energy resources," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 831-838, 2007.
- [16] A. K. Basu, "Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs—A comprehensive survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [17] A. Sinha, et al., "Setting of market clearing price (MCP) in microgrid power scenario," in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-8.
- [18] H. Kim and M. Thottan, "A two- stage market model for microgrid power transactions via aggregators," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 16, pp. 101-107, 2011.
- [19] S. Chowdhury, et al., *Microgrids and active distribution networks*: Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [20] L. Zhang, J. Zhao, X. Han, L. Niu; , "Day-ahead Generation Scheduling with Demand Response," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES* , vol., no., pp.1-4, 2005



Karma Weibull/Log-Normal Sönümlenmeli Kanalın Hata Olasılığı Analizi

Mehmet BİLİM^{1*}

¹Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kocasinan/KAYSERİ

Öz

Bu çalışmada, tek-girişli tek-çıkışlı (single-input single-output, SISO) sistemin karma Weibull/log-normal sönümlenmeli kanallardaki hata olasılığı incelenmiştir. Ele alınan SISO sisteminin birçok gerçekçi iletişim senaryosundaki sönümlenme etkilerini karakterize etmede faydalı olan karma Weibull/log-normal ortamında analizinin yapılması hedeflenmiştir. Bu yüzden, Weibull/log-normal sönümlenmeli kanalının kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) kullanılarak hata olasılığı ifadesi kapalı formda elde edilmiştir. Önerilen bu ifade CDF tabanlı olup, farklı ikili sayısal modülasyon türleri için geçerlidir. Çalışmada sunulan bütün sonuçlar bilgisayar benzetimleri ile doğrulanmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 06/09/2018

Düzeltilme: 03/01/2019

Kabul: 14/01/2019

Anahtar Kelimeler

Weibull/log-normal,
hata olasılığı,
kümülatif dağılım
fonksiyonu

Keywords

Weibull/log-normal,
error probability,
cumulative distribution
function.

Error Probability Analysis of a Composite Weibull/Log-Normal Fading Channel

Abstract

In this study, error probability of a single-input single-output (SISO) system is investigated over a composite Weibull/log-normal fading channel. We aim to study a SISO system in the composite Weibull/log-normal composite fading model which is useful in characterizing fading effects in numerous realistic communication scenarios. Therefore, a closed-form error probability expression was derived by using cumulative distribution function (CDF) of a Weibull/log-normal fading channel. The proposed error probability expression is based on CDF and is valid for different binary digital modulation types. Results that are given in this study were confirmed by computer simulations.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin oluşturulmasında yüksek veri hızı, düşük güç tüketimi, düşük gecikme zamanı (latency), yüksek spektral ve enerji verimliliği gibi faktörler gözetilmektedir [1-5]. Bütün bu faktörlere ek olarak, farklı türdeki haberleşme sistemlerinin analizleri gerçekleştirilirken kablosuz iletim ortamlarının tanımlanması da önemli bir husus olarak ön plana çıkmaktadır. Kablosuz haberleşme sistemleri için en yaygın olarak kullanılan başlıca sönümlü kanal modelleri: Rayleigh, Rician ve Nakagami- m olarak sıralanmaktadır. Rayleigh kanal modeli, verici ile alıcı arasındaki direk görüş hattının olmadığı (non line-of-sight, NLOS) durumu temsil etmekte iken Rician kanal modeli ise verici ve alıcı arasındaki direk görüş hattının olduğu (line-of-sight, LOS) durumu tanımlamaktadır. Küçük ölçekli sönümlenme ve bina dışı ortamlardaki iletim hattının tanımlanmasında oldukça başarılı olan bir diğer iletim kanalı modeli ise Nakagami- m dağılımıdır [6]. Bu kanal modelinde m sönümlenme parametresinin ayarlanması ile kanal ortamının sönümlenme şiddeti artmakta veya azalmaktadır.

Bütün bu anlatılanların yansira, kablosuz iletim ortamları çok-yollu sönümlenme ve gölgeleme etkileri gibi bozucu durumlardan etkilenmektedir [7]. Bu sebeple daha gerçekçi kanal ortamlarının temsil edilmesi için bu bozucu etkileri ele alan kanal tipleri ortaya atılmıştır [8-13]. [8]-[10]'da sunulan çalışmalarda sırasıyla, daha önce bahsedilen klasik sönümlenme modellerini kapsayan κ - μ , gölgeli κ - μ ve α - μ sönümlü kanal modelleri sunulmuştur. κ - μ kanal dağılımının fiziksel ölçümlerde küçük ölçekli sönümlenmeyi daha iyi temsil ettiği ve bu kanal tipinin LOS durumunu çok-yollu sönümlenme etkisi altında daha iyi tanımladığı

*İletişim yazarı, e-mail: mbilim@nny.edu.tr

gösterilmiştir [9]. [10]'daki çalışmada ise [9]'da sunulan κ - μ kanal tipine gölgeleme etkisi de dahil edilerek daha farklı bir kanal dağılımı önerilmiştir. Yacoub, [10]'da yaptığı çalışmada α - μ olarak adlandırılan ve deneysel ölçümlerde bina dışı çevresel etkileri göz önüne alan farklı bir kanal tipi geliştirmiştir. Küçük ölçekli sönümlenme etkisi ile birlikte NLOS durumunun da var olduğu kablosuz iletim ortamının tanımlanması için η - μ kanal dağılımı ortaya atılmıştır [11]. Buna ilaveten [12]'de sunulan çalışmada iki değişkenli κ - μ dağılımına sahip farklı bir kanal modeli geliştirilmiştir. Son dönemde yapılan [13] çalışmada ise α - η - κ - μ isimli çok daha komplike ve genelleştirilmiş bir kanal modeli önerilmiştir. Ancak bu kanal tipi ise matematiksel olarak çok karmaşıktır.

Bütün bu kanal modellerine [8-13] ek olarak, Weibull sönümlü kanal modeli [14, 15]'te sunulan çalışmalarda önerilmiş, bina içi ve dışı ortamlarda çok yollu yayılma etkisini yansıtabilme özellikleri deneysel olarak gösterilmiştir. Weibull dağılımı [8-13]'te sunulan kanal tiplerine göre daha az karmaşıklığa sahiptir. Bu kanal modeli farklı kablosuz iletişim uygulamalarında kullanılmıştır [16-19]. Weibull iletim kanalının belirli frekans aralığında çalışan telsiz sayısal sistemler için çok iyi uyum gösterdiği [16]'daki çalışmada detaylı olarak izah edilmiştir. Bilim *vd.* çöz-ve-aktar işbirlikli serpiştirme bölmeli çoklu erişim sistemlerinin Weibull sönümlü kanallardaki performansının teorik ve simülasyon incelemelerini sunmuşlardır [17, 18]. Bu çalışmalara ek olarak, kablosuz iletim hattının doğru tanımlanabilmesi ve kuramsal çalışmalar için "IEEE Vehicular Technology Society Committee" tarafından Weibull kanal ortamının kullanılması [19]'da verilen raporda tavsiye edilmektedir. Diğer bir deyişle, [19]'da sunulan raporda, Weibull kanal ortamının gerçek kablosuz iletim ortamları ile test sonuçlarının uygunluğu açıkça izah edilmiştir. Weibull kanalının bütün bu anlatılan özelliklerine ek olarak log-normal dağılımı ile birleşimiyle yeni bir karma tipi olarak Weibull/log-normal sönümlü kanal modeli geliştirilmiştir [20]. Bu sayede log-normal dağılımı kullanılarak gölgeleme etkisinin de Weibull dağılımına yansıtılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada da hem bu özellikleri barındıran Weibull kanal modeli hem de gölgeleme etkisinin yansıtılmasındaki başarısı oldukça iyi olan log-normal dağılımının birlikte kullanıldığı karma Weibull/log-normal kanal modeli seçilmiştir.

Bilindiği kadarıyla, literatürde Weibull/log-normal karma sönümlü bir kanalda SISO sisteminin hata olasılığının teorik olarak analizi sunulmamıştır. Literatürde bu noktada önemli bir boşluk bulunmaktadır. Weibull/log-normal karma sönümlü kanal modelinin bina içi ve dışı ortamları temsil etmedeki, çok-yollu ve gölgeleme etkilerini yansıtmadaki kabiliyeti göz önünde bulundurulursa, bir SISO sisteminin bu kanal modelindeki hata olasılığının yapılması literatüre katkı sağlayacaktır. Yapılan teorik analizde öncelikle bir karma Weibull/log-normal sönümlü kanal modelinin kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) ifadesi ele alınmıştır. Daha sonra bu CDF ifadesi kullanılarak hata olasılığı analizi incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda kapalı formda bir hata olasılığı ifadesi türetilmiştir. Türetilen bu ifade farklı sayısal modülasyon türleri için geçerlidir. Elde edilen kapalı formdaki hata olasılığı ifadesi yardımıyla sunulan sonuçlar bilgisayar benzetimleri ile doğrulanmıştır. Sunulan sonuçlarda farklı sönümlenme parametre değerleri ele alınmış ve beklenildiği gibi sönümlenme parametresinin artması ile sonuçların iyileştiği gösterilmiştir. Ayrıca sistemdeki farklı modülasyon türleri seçilerek detaylı analizler sunulmuştur.

2. SİSTEM VE KANAL MODELİ (SYSTEM AND CHANNEL MODEL)

Bu çalışmada, tek bir kablosuz iletim hattına sahip sönümlü bir kanal ile haberleşen verici ve alıcı çifti düşünülmektedir. Verici ve alıcıdaki modülasyon/demodülasyon türleri: ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK), ayrımsal faz kaydırmalı anahtarlama (differential phase shift keying, DPSK) ve ikili frekans kaydırmalı anahtarlama (binary frequency shift keying, BFSK) şeklindedir. Bu çalışmada, daha öncede belirtildiği gibi Weibull/log-normal karma sönümlü kanal modeli kullanılmıştır. Kablosuz iletişimde iletim ortamları olan, bina içi ve dışı çevreleri temsil etmede bu kanal modelinin kabiliyeti oldukça iyidir. Buna ilaveten, yine kablosuz iletişimde sıklıkla karşılaşılan çokyollu ve gölgeleme etkilerini yansıtmada başarılı olan iyi bir dağılımdır. Buna göre, bir karma Weibull/log-normal kanalının olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) şu şekilde bulunur:

$$f(\gamma) = \int_0^{\infty} f(\gamma|x)f(x)dx. \quad (1)$$

Burada x alıcı taraftaki ortalama işaret-gürültü oranını (signal-to-noise ratio, SNR) belirtmekte iken γ alınan anlık SNR'yi tanımlamaktadır. $f(\gamma|x)$ Weibull dağılımının PDF'sini, $f(x)$ ise log-normal dağılımının PDF'sini belirtmektedir ve sırasıyla şu şekildedir:

$$f(\gamma|x) = \frac{c}{2} \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)}{x} \right)^{\frac{c}{2}} \gamma^{\frac{c}{2}-1} \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{x} \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)\right)^{\frac{c}{2}}\right), \gamma \geq 0 \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log_e x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

burada c Weibull sönümlenme parametresi, $\Gamma(\cdot)$ gamma fonksiyonunu belirtmektedir. μ ve σ sırasıyla rastgele $\log_e x$ değişkeninin ortalama değerini ve standart sapmasını tanımlamaktadır. Eşitlik (2) ile verilen PDF ifadesi ters Weibull (inverse Weibull ya da Frechet) dağılımının genel bir halidir. Eşitlik (2) ve (3), (1)'de yerine yazılırsa ve [7, eşitlik (6)] yardımıyla bir karma Weibull/log-normal kanalının PDF'si

$$f(\gamma) \approx \frac{2}{3} \varphi(\gamma; \mu) + \frac{1}{6} \varphi(\gamma; \mu + \sigma\sqrt{3}) + \frac{1}{6} \varphi(\gamma; \mu - \sigma\sqrt{3}) \quad (4)$$

olarak bulunur. Burada

$$\varphi(\gamma; y) = \frac{c}{2} \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)}{\exp(y)} \right)^{\frac{c}{2}} \gamma^{\frac{c}{2}-1} \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\exp(y)} \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)\right)^{\frac{c}{2}}\right) \quad (5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bir karma Weibull/log-normal kanalının CDF'sini bulmak için eşitlik (4) verilen PDF'nin integrali alınmalıdır. Buna göre, [7, eşitlik (8)] yardımıyla,

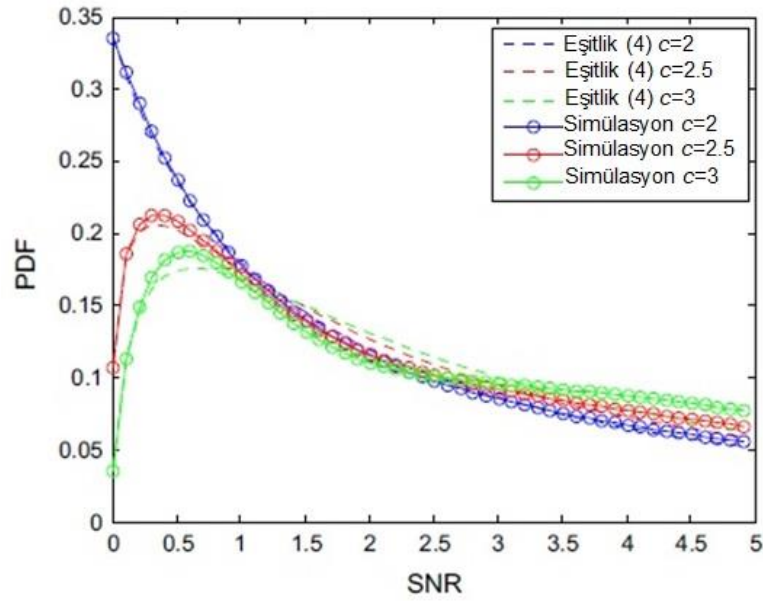
$$F(\gamma) \approx \frac{2}{3} [1 - \lambda(\gamma; \mu)] + \frac{1}{6} [1 - \lambda(\gamma; \mu + \sigma\sqrt{3})] + \frac{1}{6} [1 - \lambda(\gamma; \mu - \sigma\sqrt{3})] \quad (6)$$

şeklinde bulunur. Burada

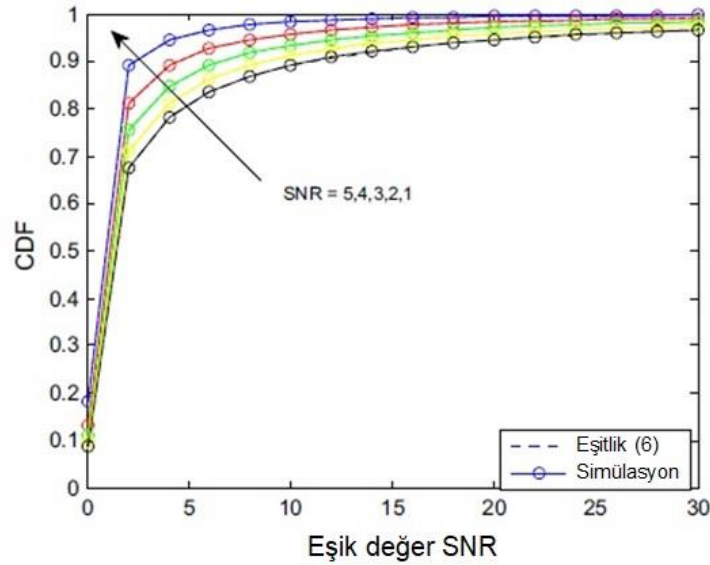
$$\lambda(\gamma; y) = \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\exp(y)} \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)\right)^{\frac{c}{2}}\right) \quad (7)$$

olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (4) ile verilen bir karma Weibull/log-normal kanalın toplam ve yaklaşık PDF ifadesinin farklı Weibull parametrelerine (farklı c değerlerine ait) göre değişimi Şekil 1'de verilmektedir. Eşitlik (6) ile elde edilen bir karma Weibull/log-normal kanalın toplam ve yaklaşık CDF ifadesinin farklı SNR değerlerine göre eşik SNR'ye bağlı değişim grafiği ise Şekil 2 ile gösterilmektedir.

Şekil 1 ve 2 ile verilen yaklaşık PDF ve CDF grafikleri gözönüne alındığında, eşitlik (4) ve (6) ile verilen yaklaşık PDF ve CDF ifadelerinin sonuçlarının gerçek (simülasyon) sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu durum hata analizi sonunda elde edilecek olan kapalı formdaki nihai ifadenin doğruluğunu arttıracaktır. Çünkü kapalı formdaki hata olasılığı ifadesi, eşitlik (6) ile verilen yaklaşık CDF ifadesi kullanılarak bulunacaktır.



Şekil 1. Farklı Weibull sönümlenme parametrelerine göre eşitlik (4) ile verilen PDF ifadesinin nümerik ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması [7]. (Comparison of numerical and simulation results for the PDF expression given by equation (4) with different Weibull fading parameters.)



Şekil 2. Farklı SNR değerlerine göre eşitlik (6) ile verilen PDF ifadesinin nümerik ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması [7]. (Comparison of numerical and simulation results for the CDF expression given by equation (6) with different SNR values.)

3. HATA OLASILIĞI ANALİZİ (ERROR PROBABILITY ANALYSIS)

Toplam CDF'ye bağlı olarak hata olasılığı teorik olarak aşağıdaki gibi hesaplanır [21, eşitlik (20)]:

$$P_e = \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \int_0^{\infty} \exp(-r\gamma) \gamma^{p-1} F(\gamma) d\gamma. \quad (8)$$

Burada r ve p farklı modülasyon türlerinin hesaplanması için kullanılan parametrelerdir. Örneğin; $r=1$, $p=0.5$ alındığında BPSK, $r=1$, $p=1$ alındığında DPSK ve $r=0.5$, $p=0.5$ alındığında BFSK olmaktadır. Eşitlik (6) ile bulunan toplam CDF ifadesi eşitlik (8)'de yerine yazılırsa

$$P_e \approx \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \exp(-r\gamma) \gamma^{p-1} \left\{ \frac{2}{3} [1 - \lambda(\gamma; \mu)] + \frac{1}{6} [1 - \lambda(\gamma; \mu + \sigma\sqrt{3})] + \frac{1}{6} [1 - \lambda(\gamma; \mu - \sigma\sqrt{3})] \right\} d\gamma \tag{9}$$

şeklinde bir integral elde edilir. Bu integral, birbirine benzeyen 3 farklı integral çözümünden oluşmaktadır. Buna göre eşitlik (9) aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$P_e \approx \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \{I_1 + I_2 + I_3\}. \tag{10}$$

Burada I_1 integrali şu şekildedir:

$$I_1 = \int_0^\infty \exp(-r\gamma) \gamma^{p-1} \frac{2}{3} [1 - \exp(-\gamma^{c/2} \varepsilon_1^{c/2})] d\gamma. \tag{11}$$

Eşitlik (11) ile verilen integralde $\varepsilon_1 = \Gamma(1 + 2/c) / \exp(\mu)$ şeklinde tanımlanmaktadır ve bu integralde iki parçadan oluşmaktadır:

$$I_1 = \frac{2}{3} (Q_1 - Q_2)$$

$$Q_1 = \int_0^\infty \exp(-r\gamma) \gamma^{p-1} d\gamma \tag{12}$$

$$Q_2 = \int_0^\infty \exp(-r\gamma - \gamma^{c/2} \varepsilon_1^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma$$

Q_1 integralinin çözümü [22, eşitlik (3.381.4)] yardımıyla şu şekilde türetilir:

$$Q_1 = \int_0^\infty \exp(-r\gamma) \gamma^{p-1} d\gamma = \frac{1}{r^p} \Gamma(p) \tag{13}$$

Q_2 integralinin çözümü ise [23, eşitlik (2.3.2.13)] yardımıyla şu şekilde türetilir:

$$Q_2 = \int_0^\infty \exp(-r\gamma - \gamma^{c/2} \varepsilon_1^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma$$

$$Q_2 = \begin{cases} \sum_{j=0}^{q-1} \frac{(-\varepsilon_1^{c/2})^j}{j!} \Gamma\left(p + \frac{c}{2}j\right) r^{-p-\frac{c}{2}j} {}_{t+1}F_q\left(1, \Delta\left(t, p + \frac{c}{2}j\right); \Delta(q, 1+j); (-1)^q z\right), 0 < c < 2 \\ \sum_{h=0}^{t-1} \frac{(-1)^h}{h!c/2} \Gamma\left(\frac{p+h}{c/2}\right) (\varepsilon_1^{c/2})^{-(p+h)/(c/2)} {}_{q+1}F_t\left(1, \Delta\left(q, \frac{p+h}{c/2}\right); \Delta(t, 1+h); (-1)^t z^{-1}\right), c > 2 \end{cases} \tag{14}$$

Burada $z = \left(\frac{t}{r}\right)^t (\varepsilon_1^{c/2}/q)^q$, $\Delta(\cdot, \cdot)$ özel bir fonksiyon ve ${}_pF_q(\cdot; \cdot; \cdot)$ genelleştirilmiş hipergeometrik fonksiyonunu ifade etmekte ve sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [24]:

$$\Delta(k, a) = \left(\frac{a}{k}, \frac{a+1}{k}, \dots, \frac{a+k-1}{k} \right) \quad (15)$$

$${}_pF_q(a_1, \dots, a_p; b_1, \dots, b_q; x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a_1)_k (a_2)_k \cdots (a_p)_k}{(b_1)_k (b_2)_k \cdots (b_q)_k} \frac{x^k}{k!} \quad (16)$$

Eşitlik (14) ile verilen çözüm parçalı çözüm olup, $c=2$ durumunu içermemektedir. Bu sebeple, $c=2$ için çözüm ise [22, eşitlik (3.381.4)] yardımıyla

$$Q_2 = \int_0^{\infty} \exp(-r\gamma - \gamma \varepsilon_1^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma = \frac{1}{(r + \varepsilon_1^{c/2})^p} \Gamma(p) \quad (17)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (11)-(17) arası verilen çözüm işlemleri I_1 integrali içindir. Bu adımlara benzer şekilde I_2 ve I_3 integralleri de çözülebilir. Buna göre I_2 integrali için $\varepsilon_2 = \Gamma(1+2/c) / \exp(\mu + \sigma\sqrt{3})$ olarak tanımlanmakta ve

$$I_2 = \frac{1}{6} (Q_1 - Q_3) \quad (18)$$

$$Q_3 = \int_0^{\infty} \exp(-r\gamma - \gamma^{c/2} \varepsilon_2^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma$$

$$Q_3 = \int_0^{\infty} \exp(-r\gamma - \gamma^{c/2} \varepsilon_2^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma$$

$$Q_3 = \begin{cases} \sum_{j=0}^{q-1} \frac{(-\varepsilon_2^{c/2})^j}{j!} \Gamma\left(p + \frac{c}{2}j\right) r^{-p-\frac{c}{2}j} {}_{t+1}F_q\left(1, \Delta\left(t, p + \frac{c}{2}j\right); \Delta(q, 1+j); (-1)^q z\right), 0 < c < 2 \\ \sum_{h=0}^{t-1} \frac{(-1)^h}{h!c/2} \Gamma\left(\frac{p+h}{c/2}\right) (\varepsilon_2^{c/2})^{-(p+h)/(c/2)} {}_{q+1}F_t\left(1, \Delta\left(q, \frac{p+h}{c/2}\right); \Delta(t, 1+h); (-1)^t z^{-1}\right), c > 2 \end{cases} \quad (19)$$

olarak çözümler elde edilmektedir. Aynı şekilde I_3 integrali için $\varepsilon_3 = \Gamma(1+2/c) / \exp(\mu - \sigma\sqrt{3})$ olarak alınır ve çözümünü aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I_3 = \frac{1}{6} (Q_1 - Q_4) \quad (20)$$

$$Q_4 = \int_0^{\infty} \exp(-r\gamma - \gamma^{c/2} \varepsilon_3^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma$$

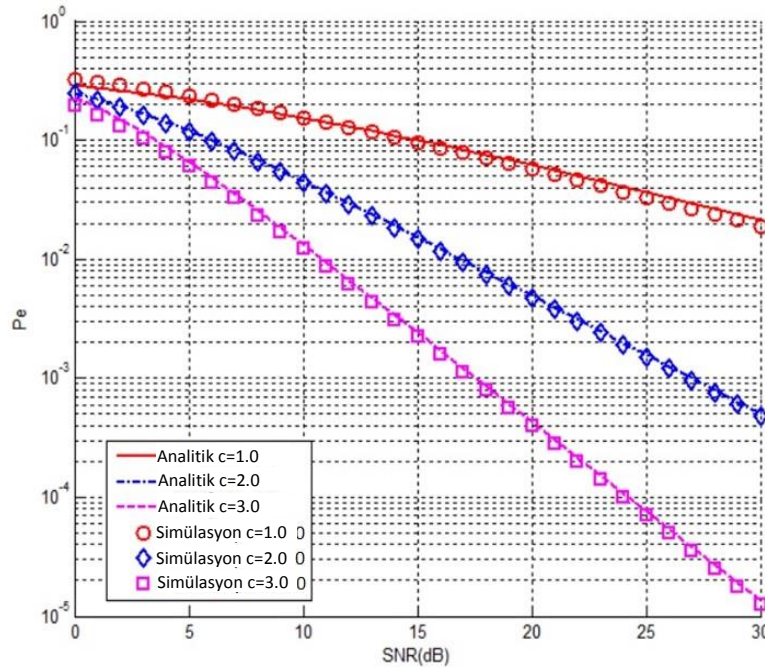
$$Q_4 = \int_0^{\infty} \exp(-r\gamma - \gamma^{c/2} \varepsilon_3^{c/2}) \gamma^{p-1} d\gamma$$

$$Q_4 = \begin{cases} \sum_{j=0}^{q-1} \frac{(-\varepsilon_3^{c/2})^j}{j!} \Gamma\left(p + \frac{c}{2}j\right) r^{-p-\frac{c}{2}j} {}_{t+1}F_q\left(1, \Delta\left(t, p + \frac{c}{2}j\right); \Delta(q, 1+j); (-1)^q z\right), 0 < c < 2 \\ \sum_{h=0}^{t-1} \frac{(-1)^h}{h!c/2} \Gamma\left(\frac{p+h}{c/2}\right) (\varepsilon_3^{c/2})^{-(p+h)/(c/2)} {}_{q+1}F_t\left(1, \Delta\left(q, \frac{p+h}{c/2}\right); \Delta(t, 1+h); (-1)^t z^{-1}\right), c > 2 \end{cases} \quad (21)$$

I_1 , I_2 ve I_3 integralleri için türetilen (13), (14), (17), (19) ve (21)'deki çözümler, eşitlik (10)'da yerine yazılarak bir karma Weibull/log-normal sönümlü kanal için hata olasılığı ifadesi kapalı formda elde edilir.

4. NÜMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

Bu bölümde, bir karma Weibull/log-normal sönümlü kanaldaki SISO sisteme ait teorik hata olasılığı analizleri bilgisayar simülasyonlarıyla doğrulanmaktadır. Burada, BPSK, BFSK ve DPSK modülasyonlarına ait c sönümlenme parametresinin farklı değerleri için hata performansı sonuçları verilmektedir. Ayrıca, BPSK ve DPSK modülasyon türlerini karşılaştırma amacıyla, farklı c parametre değerlerine ele alacak şekilde SISO sisteminin hata performansı sonuçları da verilmektedir. Şekillerde, DPSK, BPSK ve BFSK modülasyonları için sırasıyla (p,r) modülasyon sabitleri (1,1), (0.5,1) ve (0.5,0.5) olarak seçilmiştir. Şekil 3'te, DPSK modülasyonu kullanan SISO sisteminin farklı c parametre değerleri için hata olasılığı performansları görülmektedir. Burada, c sönümlenme parametresinin değiştirilmesi ile bir karma Weibull/log-normal sönümlü kanalın sönümlenme şiddetinin farklı olduğu durumlar gösterilmektedir.

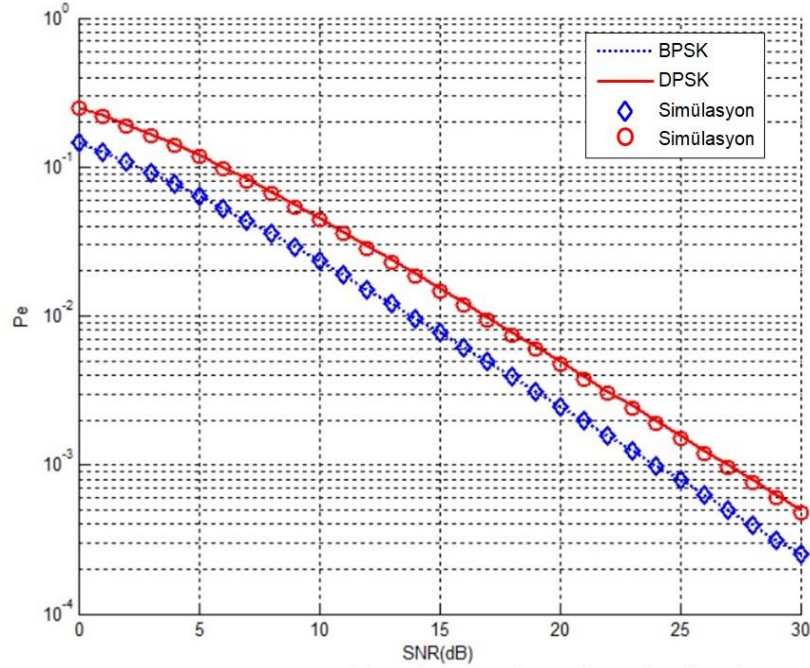


Şekil 3. DPSK modülasyonunun kullanan SISO sistemin farklı c parametreleri için hata olasılığı (Error probability for different c parameters of the SISO system using DPSK modulation)

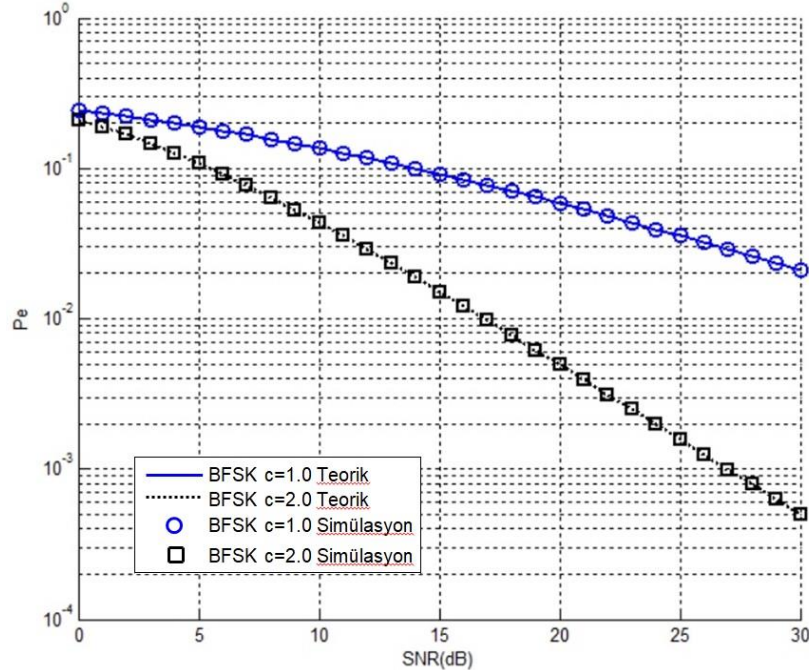
Şekil 3'teki eğriler, $c=1, 2$ ve 3 için elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere simülasyon sonuçları ile teorik sonuçlar tam bir uyum içindedir. Sistem performansı c sönümlenme parametresinin değeri arttıkça iyileşmektedir. Ayrıca, $c=1$ durumu için eşitlik (14), (19) ve (21)'in ilk kısımları ($0 < c < 2$ durumuna ait kısımlar), eşitlik (10)'da yerine yazılıp sonuca ulaşılmıştır. $c=3$ durumu için ise eşitlik (14), (19) ve (21)'in son kısımları ($c > 2$ durumuna ait kısımlar), eşitlik (10)'da yerine yazılıp hesaplanmıştır. $c=2$ durumunda ise eşitlik (17) kullanılarak, eşitlik (10) ifadesinden yararlanılmıştır. Hata olasılığı eğrilerinin eğimlerinden görüldüğü üzere, c parametre değişimi performansı arttırmakta ve bilgisayar simülasyonlarıyla tutarlı sonuçlar vermektedir. c sönümlenme parametresi 2 değerinden 3 değerine çıkarıldığında, hata olasılığının 10^{-2} değeri için, sistem performansı yaklaşık 7 dB iyileşmektedir.

Şekil 4'te, DPSK modülasyonu kullanan bir SISO sistem ile BPSK modülasyonu kullanan bir SISO sistemin bir Weibull/log-normal sönümlü kanalındaki hata olasılığı performansları karşılaştırılmaktadır. Şekil 4'teki eğriler, $c=2$ koşulları için elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, (10)'da verilen yaklaşık hata olasılığı ifadesi kullanılarak elde edilen teorik sonuçlar ile simülasyon sonuçları oldukça uyumludur ve BPSK modülasyonunun üstünlüğü SNR değeri arttıkça ortaya çıkmaktadır. Hata olasılığının 10^{-3} değeri için, BPSK modülasyonu kullanan sistemin DPSK kullanan sisteme göre yaklaşık 3.5 dB daha iyi

performansı sağlamaktadır. Şekil 5’te ise SISO sistemlerinde, karma Weibull/log-normal sönümlü kanalın sönümlenme parametre değerlerinin sırasıyla $c=1$ ve $c=2$ olduğunda ve farklı bir modülasyon türü olan BFSK modülasyonu kullanıldığında hata olasılığı performansına etkisi incelenmiştir. Beklendiği üzere, aynı sistem için sistemlerde c değeri artırıldığında, sistemin hata olasılığı performansı artmaktadır. Bu durum Şekil 5’te de gözlenmiştir. Sonuç olarak, kullanılan modülasyona bağlı olmaksızın sönümlenme parametresinin artması, karma Weibull/log-normal sönümlü kanalın iyileşmesine neden olmakta ve bu sayede hata performansı iyileşmektedir.



Şekil 4. $c=2$ için BPSK ve DPSK modülasyonlarının performanslarının karşılaştırılması (Comparison of BPSK and DPSK modulation performances of our system for $c=2$)



Şekil 5. BFSK modülasyonu kullanan SISO sistemi için $c=1$ ve $c=2$ durumlarının hata olasılığı karşılaştırması. (Comparison of $c=1$ and $c=2$ conditions for error probability of SISO system using BFSK modulation)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada bir SISO sisteminin karma Weibull/log-normal sönümlü kanallardaki hata olasılığı analizi hem teorik hem de simülasyonlar aracılığı ile yapılmıştır. Sunulan teorik analiz gerçekleştirilirken sisteme ait toplam PDF ifadesi bulunmuş, elde edilen PDF yardımı ile sisteme ait toplam yaklaşık CDF ifadesi elde edilip, bu ifade kullanılmıştır. Sistemin hata olasılığı üzerindeki etkileri farklı kanal sönümlenme değerleri için detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Buna ek olarak ele alınan sistemin performans analizleri farklı modülasyon türleri göz önünde bulundurularak çeşitli senaryolar ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre teorik ve simülasyon sonuçları oldukça uyumlu iken, sönümlenme parametresi değeri arttıkça performansın beklendiği üzere iyileştiği görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Fodor G., Rajatheva N., Zirwas W., Thiele L., Kurras M., Guo K., Tölle A., Sorensen J.H., de Carvalho E., “An overview of massive MIMO technology components in METIS”, IEEE Commun. Mag, Cilt 55, No 6, 155-161, 2017.
- [2]. Xu C., Hu Y., Liang C., Ma J., Ping L., “Massive MIMO, non-orthogonal multiple access and interleaved division multiple access”, IEEE Access, Cilt 5, 14728-14748, 2017.
- [3]. Shafi M., Molisch A.F., Smith P.J., Haustein T., Zhu P., De Silva P., Tufvesson F., Benjebbour A., Wunder G., “5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice”, IEEE J. Sel. Areas Commun., Cilt 35, No 6, 1201-1221, 2017.
- [4]. Sonmez M., “PDSM sinyalinin çoklu örnekleme tekniği kullanılarak demodülasyonu,” GU J Sci Part C., Cilt 5, No 4, 145-150, 2017.
- [5]. Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R., “An overview of massive MIMO: benefits and challenges,” IEEE J. Sel. Topics Signal Process., Cilt 8, No 5, 742-758, 2014.
- [6]. Nakagami, M. “The m -distribution, a general formula of intensity distribution of rapid fading”, Oxford: Pergamon, England, 1960.
- [7]. Singh R., Soni S.K., Raw R.S., Kumar S., “A new approximate closed-form distribution and performance analysis of a composite Weibull/Log-Normal fading channel”, Wireless Pers. Commun., Cilt 92, No 3, 883-890, 2017.
- [8]. Yacoub M.D., “The κ - μ distribution and the η - μ distribution”, IEEE Antennas Propag. Mag., Cilt 49, No 1, 68-81, 2007.
- [9]. Paris J.F., “Statistical characterization of κ - μ shadowed fading”, IEEE Trans. Veh. Technol., Cilt 63, No 2, 518-526, 2014.
- [10]. Yacoub M.D., “The α - μ distribution: A physical fading model for the Stacy distribution”, IEEE Trans. Veh. Technol., Cilt 56, No 1, 27-34, 2007.
- [11]. Peña-Martín J.P., Romero-Jerez J.M., Tellez-Labao C., “Performance of selection combining diversity in η - μ fading channels with integer values of μ ”, IEEE Trans. Veh. Technol., Cilt 64, No 2, 834-839, 2015.
- [12]. Villavicencio M.A.G., de Souza R.A.A., de Souza G.C., Yacoub M.D., “A bivariate κ - μ distribution”, IEEE Trans. Veh. Technol., Cilt 65, No 7, 5737-5743, 2016.
- [13]. Yacoub M.D., “The α - η - κ - μ fading model”, IEEE Trans. Veh. Technol., Cilt 64, No 8, 3597-3610, 2016.
- [14]. Hashemi, H. “The indoor radio propagation channel”, Proceedings of IEEE, Cilt 81, No 7, 943-968, 1993.
- [15]. Tzeremes G., Christodoulou C.G., “Use of Weibull distribution for describing outdoor multipath fading”, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Antonio, Texas, USA, 232-235, 16-21 Haziran 2002.
- [16]. Babich F., Lombardi G., “Statistical analysis and characterization of the indoor propagation channel”, IEEE Trans. Commun., Cilt 48, No 3, 455-464, 2000.
- [17]. Bilim M., Kapucu N. Develi I., “Dual-hop N -relay assisted transmission for IDMA systems over Weibull fading channels”, Elektronika Ir Elektroniteknika, Cilt 21, No 4, 69-72, 2015.

- [18]. Bilim M., Kapucu N. Develi I., “Cooperative IDMA systems with regenerative relays over Weibull fading channels: outage probability and error analysis”, *IET Commun.*, Cilt 11, No 7, 993-999, 2017.
 - [19]. Adawi N., Bertoni H.L., Child J.R., “Coverage prediction for mobile radio systems operating in the 800/900 MHz frequency range”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Cilt 37, No 1, 3-72, 1988.
 - [20]. Mitic, M.A., Jakovljevic, M.M., “Second-order statistics in Weibull-lognormal fading channels”, In: *Proceedings of International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services*, Serbia, 529-532, 26-28 Eylül 2007.
 - [21]. Sharma N., Bansal A., Garg P., “Decode-and-forward relaying in mixed η - μ and gamma-gamma dual hop transmission system”, *IET Commun.*, Cilt 10, No 14, 1769-1776, 2016.
 - [22]. Gradshteyn, I. S., Ryzhik, I. M., “Table of integrals, series and products”, Academic Press, London, UK, 2007.
 - [23]. Prudnikov, A. P., Brychkov, Y. A., Marichev, O. I. “Integrals and series (Vol. 1)”, London: Gordon, UK, 1986.
 - [24]. Nadarajah S., Kotz S., “On the Weibull MGF”, *IEEE Trans. Commun.*, Cilt 55, No 7, 1287, 2007.
- J. Bear, *Hydraulics of Groundwater*, Dover, Minneola, 2007.



Futbol Maçları İçin Bilgisayarlı Görü Destekli Gol Karar Sistemi(GolKaSis): Bir Prototip Çalışma

Emre DANDIL^{1,*}, İnanç ÖZKUL¹

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 11200, Gülümbe Yerleşkesi Merkez/BİLECİK

Öz

Futbol maçlarında hakemlerin verebileceği kararlara yardımcı olması amacıyla, otonom sistemlere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyacın ana sebebi hakemlerin önemli maçlarda sonuca etki edebilecek kritik hatalar yapabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı, birçok ülkede futbol maçlarında hakemlerin yanı sıra bilgisayarlı görü sistemine dayalı çalışan yardımcı hakem sistemleri de devreye girmiştir. Bu sistemler ile hakem hataları azaltılarak daha adil bir rekabet ortamı sağlanmaktadır. Bu çalışmada futbol maçlarında gol olayının tespiti için bir bilgisayarlı görü sistemi(GolKaSis) tasarlanmıştır. GolKaSis'te öncelikle, tasarlanan futbol sahası prototipinde uygun bir bölgeye yerleştirilen kameradan alınan videolardan topun kale tam olarak çizgisini geçtiği ve geçmediği pozitif ve negatif görüntüler kullanılarak bir veriseti oluşturulmuştur. Bu görüntülerden pozitif olanlar gol olayını gösterenlerden, negatif olanlar ise gol olayının meydana gelmediği video görüntülerinden oluşmaktadır. Geliştirilen bilgisayarlı görü sisteminde gerçek zamanlı alınan video görüntüleri ile pozitif görüntülerin eşleştirilmesi Haar Kaskad Sınıflandırıcı ile gerçekleştirilerek gol olayı tespit edilmektedir. Tasarlanan prototip üzerinde yapılan test işlemlerinde önerilen bilgisayarlı görü sisteminin gol olayını tespit etmede %91 başarımlı gösterdiği görülmüştür.

Makale Bilgisi

Başvuru: 04/12/2018

Düzeltilme: 31/01/2019

Kabul: 31/01/2019

Anahtar Kelimeler

Futbol maçı

Gol çizgisi tespiti

Bilgisayarlı görü sistemi

Haar Kaskad sınıflandırıcı

Keywords

Football match

Goal-line detection

Computer vision system

Haar Cascade classifier

Computer Vision Based Goal Decision System for Football Match: A Prototype Study

Abstract

The need for autonomous systems increases day by day in order to be able to appeal to the referee's decisions in soccer. The main reason for this increase in demand is the fact that referees can make critical mistakes that could have an effect on important matches. Therefore, in addition to referees in games, assistant referee systems with a computer vision system have been engaged in soccer games. It is aimed to provide fair competition environment by reducing mistakes with such systems. In this study, a computer vision system, GolKaSis, was designed for the determination of the goal event in football matches. In the GolKaSis, firstly, the images taken from the videos obtained from the cameras placed in a region close to the tower in the designed football field prototype are separated as negative and positive. The ones that are positive from these images are those showing the goal event, the ones that are negative are the video images where the goal event is not coming to fruition. In the developed computer vision system, the matching of the positive video with the video images taken in real time is determined by providing Haar Cascade Classifier. It has been seen that the computerized vision system proposed in the test procedures on the designed prototype correctly determined the goal event with 91% success rate.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Futbol dünya çapında çok sevilen ve ilgi gören spor dallarının başında gelmektedir. Bu spor dalı günün şartlarına göre yeniliklere de açıktır ve zamanla kurallarında değişiklikler olabilmektedir. Maç sırasında hakemlerin verdiği yanlış kararlardan dolayı bazı takımlar mağduriyet yaşayabilmektedir. 1966 Dünya kupasında İngiltere ve Almanya arasında oynanan müsabakadaki "Wembley Golü" muhtemelen futbol tarihindeki en tartışmalı gol olayıdır. Tartışmalı olmasının nedeni ise pozisyonun gol mü, yoksa gol değil mi olduğunun üzerinde yıllarca farklı fikir üretilmiş olmasıdır[1].

*İletişim yazarı, e-mail: emre.dandil@bilecik.edu.tr

Futbol maçlarında bu gibi gol pozisyonları hakkında tartışmaların önüne geçilebilmesi ancak gelişen teknolojinin imkanlarının futbol kuralları ile birleştirilerek, hakemlerin daha doğru ve adil kararlar vermesini sağlanması ile mümkün olabilir. Bu yardımcı teknolojik yenilikler yüksek çözünürlüğe ve kaliteye sahip kameralar ile alınan görüntülerin gerçek zamanlı işlenerek hakemlerin doğru karar verebilmesini sağlayan bilgisayarlı görü sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda, gerçek zamanlı bilgisayarlı görü sistemleri bilgisayar teknolojilerine bağlı olarak inanılmaz bir hızla gelişmiştir. Aynı şekilde makine öğrenmesi sistemleri de hızla gelişmektedir ve birçok alanda uygulamalarını görmek mümkündür[2]. Bilgisayarların giderek boyutlarının küçülmesi, bellek kapasitelerinin ve veri işleme hızlarının artışı ile birlikte karar destek sistemlerinin de başarı oranı artmaktadır. Benzer bir senaryo günümüz futbol karşılaşmaları için de geçerlidir. Futbol maçlarında hakemlerin verebileceği kararlara yardımcı olması amacıyla, otonom sistemlere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu talep artışının ana sebebi maçlarda hakemlerin önemli maçlarda sonuca etki edebilecek kritik hatalar yapabilmesinden kaynaklanmaktadır.

Spor video verilerinin analiz edilmesi son yıllarda önemli derece artış göstermiştir. Spor olaylarında önemli olan müsabaka anında kararın doğru olarak verilmesi olduğundan, bu amaçla önerilecek sistemlerin gerçek zamanlı, kısa sürede ve otomatik olarak bu işi yapması beklenmektedir. Başta futbol olmak üzere spor dallarının çoğunluğunda tartışmalı pozisyonlar ancak müsabakadan sonra genellikle ağır çekim tekrarını izleme ile net olarak kararlaştırılabilmektedir. Bu alanda önerilecek çalışmaların müsabaka anında kısa sürede işleme tamamlaması beklenen hedef olmaktadır.

Futbol maçlarında video verilerinden gol olayının tespiti için literatürde araştırmacılar tarafından farklı yapıda çalışmalar önerilmiştir. Aynı zamanda, gol çizgisi teknolojileri konusunda bilimsel çalışmaların yanında Şahin Gözü, GoalRef gibi ticari uygulamalar da bulunmaktadır. Bu konuda yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, çok fazla çalışma olmamakla birlikte, önerilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunun video verilerinden topun çizgiyi tam olarak geçip geçmediğinin tespiti konusunda olduğu görülmektedir.

Reid ve Zisserman [3] futbolda gol probleminin çözümü için bilgisayarlı görü temelli bir sistem önermişlerdir. Bu sistemde iki farklı görüş açısından alınan iki görüntü kullanılarak görüntü işleme algoritmaları ile topun çizgiyi geçip geçmediği kontrol edilmektedir. Ancona vd. [4] çalışmalarında tek bir kameradan elde edilen görüntüler yardımıyla futbol maçlarından gol olayının tespitini destek vektör makineleri destekli bir sistem ile tespit etmişlerdir. Chen vd.[5] çalışmalarında futbol maç videolarından gol olayının otomatik olarak çıkarılması için bir veri madenciliği altyapısı önermişlerdir. Wan vd.[6] ise çalışmalarında, MPEG formatındaki futbol maçı videolarında kale çizgilerini de dikkate alarak, kale-ağzı pozisyonlarının tespiti için Hough Transform tabanlı bir sistem önermişlerdir. Bu çalışmada topun çizgiyi geçip geçmediğinin kontrolü konusunda herhangi bir çıkarım yer almamaktadır. D’Orazio vd.[7] çalışmalarında futbol maçlarında gol olayının gerçek zamanlı tespiti için görsel bir sistem önermişlerdir. Sistemde gol çizgisinin her iki tarafında dört farklı kamera yerleştirilerek alınan verileri dört farklı bilgisayar ile eşzamanlı işlenip gol olayının tespiti yapılmaktadır. Eğer top çizgiyi geçerek gol olayı meydana gelmişse hakem bir uyarı sistemi ile bilgilendirilmektedir. Yang vd. [8] çalışmalarında, futbol maçlarının videoları üzerinde gol ağzı pozisyonlarının tespiti ve önemli pozisyonların çıkarılmasına dayalı bir bilgisayarlı görü sistemi önermişlerdir. Bir diğer çalışmada Shi ve Yu [9] videolar üzerinde gol olayının tespiti amacıyla çoklu kurallara dayalı bir çatı önermişlerdir. Kurallar görsel ipuçları, ses kaynakları ve düzenleme verilerinden oluşmaktadır. Bu alanda yapılan bir diğer çalışmada Khatoonabadi ve Rahmati [10], gol pozisyonlarında hızlı kamera efektleri ile futbolcuların izlenmesi ve sonraki pozisyonların tahmini için bir görü sistemi önermişlerdir. Bu sistem sayesinde gol sahnelerinin analizi ile menajerlere, futbolculara ve gözlemcilerle önemli pozisyonların değerlendirilmesi imkanı sunulmuştur. AO vd. [11] çalışmalarında, futbolda ceza sahasının dışındaki pozisyonların analizi için kameraların kalibrasyonuna dayalı bir bilgisayarlı görü sistemi geliştirmişlerdir. Spagnolo vd. [12] önerdikleri çalışmalarında, bir gol çizgisi görüntüleme sistemi geliştirmişlerdir. Görüntü işleme algoritmalarına göre çalışan sistemde, aday çerçeve içerisinde top belirlenerek gol çizgisini geçip geçmediğinin tespiti yapılmaktadır.

Her ne kadar literatürde farklı yöntemlere dayalı ve teknoloji ile desteklenmiş önerilen gol çizgisi teknolojileri çalışmaları olmasına karşın, bu gibi teknolojilerin futbola girmesinin yararlı olmayacağını savunan çalışmalar da mevcuttur. Örneğin Ryall[13] bir değerlendirme olarak sunduğu çalışmada, bu gibi teknolojik ve ticari yaklaşımların futbola girmesinin futbolun doğal akışını bozabileceğini, henüz

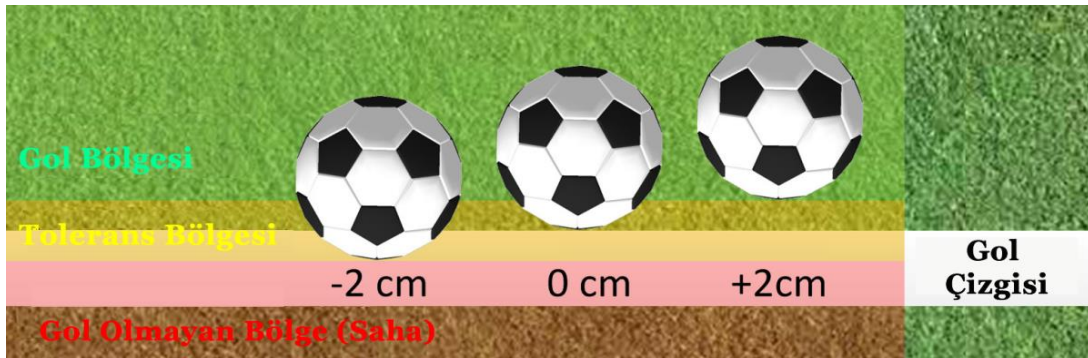
yeterince güvenilir sistemler olmadıklarını, bu sistemlerin desteğiyle verilen kararların tartışmaları daha da artırdığını ve test ile kurulum süreçlerinin ise çok fazla maliyet gerektirdiğinden bahsetmiştir.

Bu çalışmada ise, futbol maçlarında gol olayının tespiti için prototip bir bilgisayarlı görü sistemi(GolKaSis) tasarlanmıştır. Sistemde öncelikle, tasarlanan futbol sahası prototipinde kaleye yakın bir bölgeye yerleştirilen kameradan elde edilen videolardan alınan görüntüler negatif ve pozitif olarak ayrılmıştır. Bu görüntülerden pozitif olanlar gol olayını gösterenlerden, negatif olanlar ise gol olayının meydana gelmediği video görüntülerinden alınarak bir veri seti oluşturulmuştur. Yeterli sayıda görüntü üzerinde işletilen eğitim aşamasından sonra, geliştirilen bilgisayarlı görü sisteminde gerçek zamanlı alınan video görüntüleri ile pozitif görüntülerin eşleştirilmesi ile Haar Kaskad sınıflandırıcı kullanılarak gol olayının tespiti başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde gol çizgisi teknolojileri detaylı olarak sunulmuştur. Üçüncü bölümde çalışmanın materyal ve metot kısmı, dördüncü bölümde GolKaSis'in detaylı açıklaması ve final bölümünde ise çalışmanın sonuçlarına değinilmiştir.

2. GOL ÇİZGİSİ TEKNOLOJİLERİ (GOAL-LINE TECHNOLOGIES)

2012 yılında, gol kararı için uzun süre birçok farklı teknolojinin kullanılmasından sonra, Uluslararası Futbol Birliği Kurulu (IFAB) futbol maçlarında gol çizgisi teknolojisini(GLT) kullanılmasını resmi olarak onayladı. GLT hakeme topun çizgiyi tam olarak geçip geçmediği konusunda tipik olarak bir görsel izleme aracı sayesinde açık bir gösterim sunmaktadır[14]. Şekil 1'de kale bölgesinde topun gol kararı verilmesinde kullanılan alanlar tanımlanmıştır. Buradan da görülebileceği gibi gol kararının verilebilmesi için topun kale çizgisi olarak belirlenen alanı tamamen çizgiye herhangi bir açıdan değmeyecek şekilde geçmesi gerekmektedir.

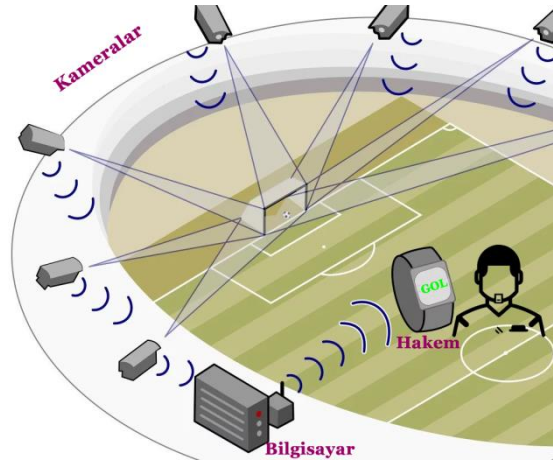
Günümüzde GLT sistemleri iki farklı yaklaşım üzerine kurulmaktadır. Bunlardan birincisi video tabanlı yaklaşım iken, ikincisi ise elektromanyetik alan tabanlı yaklaşımdır. Video tabanlı yaklaşımlarda gol bölgesini tam olarak görebilen farklı açılara kameralar yerleştirilerek gol pozisyonları güçlü bir bilgisayar tarafından gerçek zamanlı olarak analiz edilir. Burada üst düzey görüntü işleme algoritmaları ile topun gol çizgisini tam olarak geçip geçmediğinin tespiti yapılır. Elektromanyetik alan tabanlı sistemde, top içerisine yerleştirilen ve genellikle zemine gömülen elektronik devreler kullanılır. Sistemde alıcı/verici devreler yardımıyla topun çizgiyi geçip geçmediği sinyaller aracılığıyla kontrol edilir ve gerektiğinde hakeme bildirim gönderilir[14].



Şekil 1. Gol kararı alanlarının tanımlanması

2.1 Şahin Gözü (Hawk Eye)

Şahin Gözü gol çizgisi teknolojisi, stadyum çevresine her iki kale direğini de farklı açılardan görecektir şekilde yerleştirilen on dört yüksek çözünürlüklü kameradan alınan videoların görüntü işleme algoritmaları ile güçlü bir bilgisayar tarafından işlenerek gol kararının gerçek zamanlı üç boyutlu olarak verilmesini sağlar[15]. Bu teknoloji uzun bir süredir kriket, tenis ve bilardo için kullanılmaktadır. Bu teknolojiye kameralar yüksek hızda topu izler ve pozisyonu hesaplamak için Şekil 2'de görüldüğü gibi üçgen alanları kullanır. Ayrıca bu sistem İngiltere, Almanya ve İspanya gibi liglerin futbol maçlarında da 2014'ten itibaren kullanılmaya başlamıştır.



Şekil 2. Şahin Gözü gol çizgisi teknolojisinin stadyuma yerleştirilmesi

2.2 4B Gol Kontrolü (4D Goal Control)

Bu gol çizgisi teknolojisi Şahin gözüne oldukça benzemektedir. Yine stadyum çevresine yerleştirilen on dört kameradan alınan veriler değerlendirilerek, topun çizgiyi geçip geçmediği belirlenerek pozisyonun gol olup olmadığı tespit edilir[14]. Şahin gözü ile karşılaştırıldığında maliyeti daha yüksek olan bu sistem 2014 Dünya Kupasında kullanılmasına rağmen, daha sonraları kurulum ve sürdürülebilirlik maliyetleri yüzünden pek tercih edilmemiştir.

2.3 Goalminder

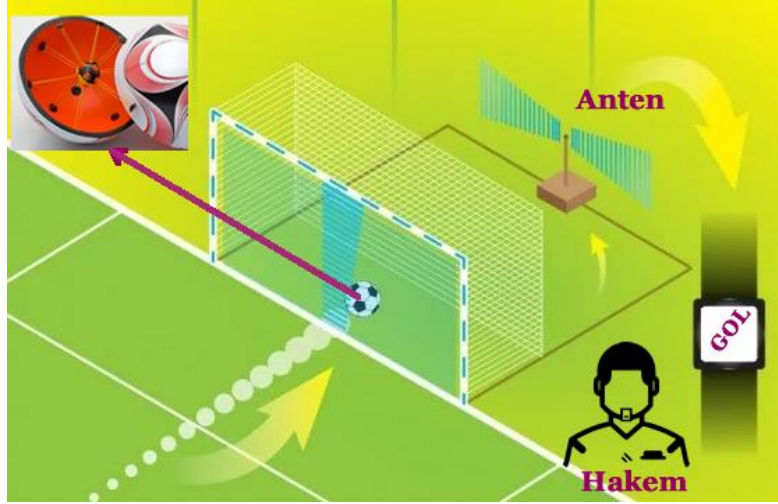
Video tabanlı başka bir gol çizgisi teknolojisidir. Bu teknolojiye kale direklerine yerleştirilen kameralar ile topun çizgiyi geçip geçmediği kontrol edilir[16]. Goalminder sisteminin kale direkleri arasında yerleştirilmiş hali Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Goalminder teknolojisi

2.4 Cairos GLT Sistem (Cairos GLT System)

Cairos gol çizgisi teknolojisi topu izlemek için elektromanyetik alan kullanır. Topun içerisine yerleştirilen bir elektronik sensör ile topun çizgiyi geçip geçmediği belirlenir[15-16]. Şekil 4'te görülebileceği gibi penaltı noktası ile kale çizgisi arasında oluşturulan manyetik alan ile top izlenir ve bilgiler anten aracılığıyla hakeme aktarılır.



Şekil 4. Cairos GLT sistem

2.5. GoalRef

GoalRef gol çizgisi teknolojisi ise topun içerisine yerleştirilen bir elektronik devre ile gol çizgisi bölgesinde oluşturulan manyetik alan geçildiğinde uyarı veren bir sistemden oluşmaktadır. Sistemde bulunan antenler ile kale direkleri arasında manyetik alan oluşturularak, top bu alanı geçer geçmez gol çizgisi uyarı sistem devreye girmektedir[1,15]. 2012 Dünya kupasında sistemin ilk denemesi de yapılmıştır.

2.6 Video Asistan Hakem(VAR) (Video Assistant Reference)

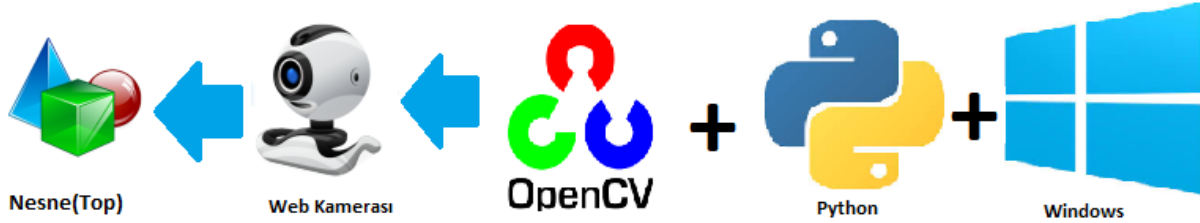
Son zamanlarda, sadece gol pozisyonu için değil, maçtaki tüm kritik pozisyonlar için önerilen VAR Sistemi ilk olarak Eylül 2016'da İtalya ile Fransa arasında oynanan hazırlık maçında denenmiştir. Bu sistemde Şekil 5'te gösterildiği üzere maç esnasında kritik kararlar için hakemlerin karar vermesine yardımcı olmaktadır. Hakem kameralar ile elde edilen verilerden bilgisayarlı görü teknikleri ile kendisine yardımcı araçlar oluşturularak geriye yönelik pozisyonları maçı durdurarak değerlendirdikten sonra nihai kararını vermektedir [17]. Böylece maçı yöneten hakemlerin skoru etkileyebilecek bir pozisyonda kararsız kalmaları halinde, saha kenarına kurulan ekrandan pozisyonu tekrar izleyip karar verebilmektedirler. Ayrıca, kurulan özel bir VAR odasında yer alan ayrı bir hakem heyeti de maçı çok sayıda ekrandan farklı açılardan takip ederek, tartışmalı pozisyonları tekrar izlediklerini maçı yöneten hakeme bildirmektedirler. 2018 Dünya Kupasında FIFA tarafından maçlarda resmi olarak kullanılmıştır ve birçok futbol liginde uygulanmaktadır.



Şekil 5. Futbol maçlarında VAR sisteminin hakemler tarafından kullanılması[17]

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada kullanılan donanımlar ile teknolojilerin gelen yapısı ve işleyişi Şekil 6'da gösterilmiştir. Kameredan alınan görüntülerin işlenmesi için geliştirilen uygulamalar Python programla dili ile OpenCV Kütüphanesi yardımıyla yürütülmüştür.



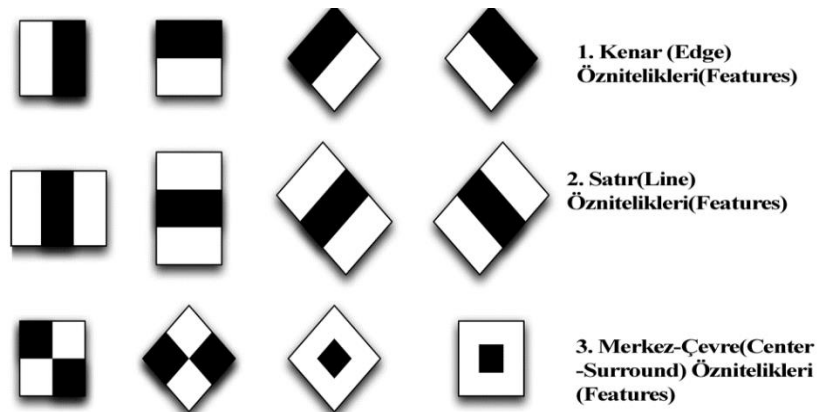
Şekil 6. Çalışmada kullanılan donanımlar ve teknolojilerin işleyişi

3.1 OpenCV Kütüphanesi(OpenCV Library)

OpenCV açık kaynak kodlu bir görüntü işleme kütüphanesidir. C, C++, Python ve Java gibi birçok programlama dil desteği bulunan OpenCV; mobil ve masaüstü olmak üzere farklı platformlarda çalışabilmektedir. OpenCV hesaplama verimliliğini arttırmak amacıyla gerçek zamanlı uygulamalar için tasarlanmıştır [18]. Bu çalışmada tasarlanan bilgisayarlı gözü sisteminde topun kale çizgisini geçip geçmediğine göre karar verilecek işlemlerin yapılabilmesi için OpenCV'nin Python için geliştirilmiş Haar kaskad Sınıflandırıcı(Haar Cascade Classifier) kütüphanesinden yararlanılmıştır.

3.2 Haar Kaskad Sınıflandırıcı (Haar Cascade Classifier)

Görüntü ön-işleme aşamasında akan video çerçevelerinde görüntünün tamamını kullanmak yerine, sadece ilgili nesnenin(top) olduğu kısmın odaklanmak, hem işlem hızını artıracak hem de daha yüksek doğruluk oranı elde edilmesini sağlayacaktır. Bu amaç için kullanılacak uygun algoritmalarından birisi Viola-Jones[19] algoritmasıdır. Çalışmada, Viola-Jones algoritması ile görüntüdeki top kısmı belirlenerek, sadece bu kısma ön-işleme uygulanmıştır. Viola-Jones algoritması videodaki topu belirlemek için dikdörtgen özellikleri kullanarak hem oldukça hızlı çalışmakta hem de yüksek oranda başarımlı sağlamaktadır. Şekil 7'de Viola-Jones algoritması ile dikdörtgen özelliklerinin çıkarılması gösterilmiştir.



Şekil 7. Viola-Jones dikdörtgen özelliklerinin çıkarılması

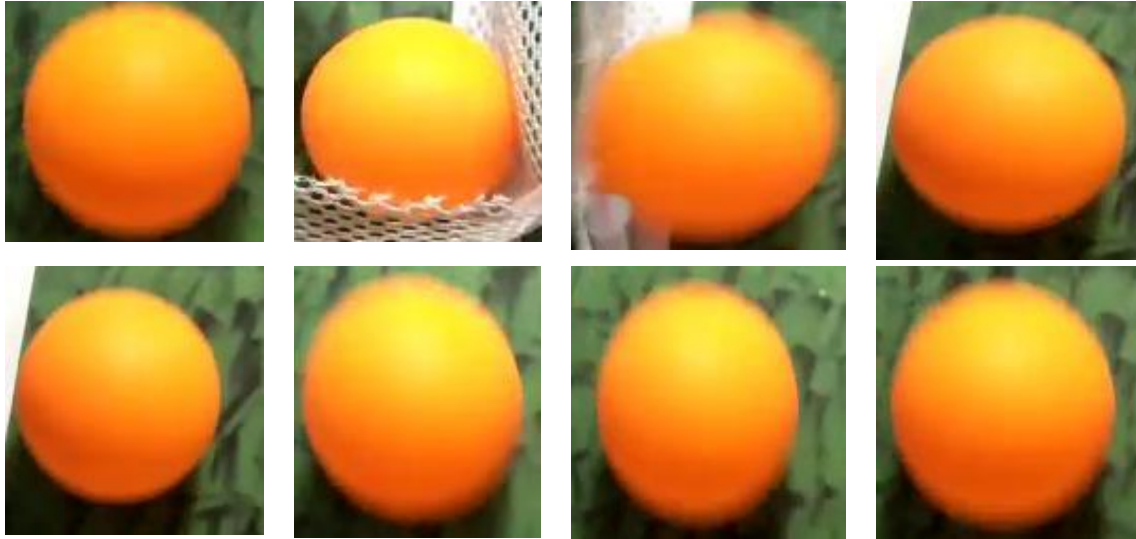
Özellik çıkarımından sonra video üzerinde nesne tanıma yapılarak gol olayının belirlenmesi için bir sınıflandırıcı kullanılmalıdır. Haar sınıflandırıcı, özellik tabanlı kaskad sınıflandırıcılarını kullanarak makine öğrenimine dayalı etkili bir nesne algılama yöntemidir[20]. Kaskad işlevi birçok pozitif ve negatif

görüntüden eğitilerek daha sonra diğer görüntüdeki nesnelere tespit etmek için kullanılır. Haar'da her özellik, Viola-Jones algoritmasındaki siyah dikdörtgenin altındaki piksellerin toplamından beyaz dikdörtgenin altındaki piksellerin toplamının çıkarılmasıyla elde edilen tek bir değerden oluşmaktadır. Böylece her bir çekirdeğin olası tüm boyutları ve konumları birçok özelliği hesaplamak için kullanılmış olmaktadır.

Bu çalışmada top tespiti işleminde Haar sınıflandırıcıyı eğitmek amacıyla bir eğitim veriseti oluşturulmuştur. Eğitim veriseti, hem içerisinde bulunması istenen nesnenin yer aldığı pozitif resimleri hem de yer almadığı negatif resimleri içermektedir. Pozitif resim içerisindeki nesneyi tespit etmek amacıyla 24x24 piksel boyutlarındaki alt-pencereler tüm resim boyunca kaydırılarak nesne taraması gerçekleştirilerek Cascade Trainer GUI[21] yazılımı ile eğitim işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu pencereler Haar-benzeri öznitelikler olarak adlandırılmaktadır. Tüm resim içerisinde bu işlemi yaparken zaman kaybını azaltmak için AdaBoost algoritması kullanılmaktadır. Negatif önyükleme kullanarak AdaBoost sınıflandırıcı yapısı Viola-Jones algoritması ile birlikte kullanılmaktadır[22].

3.3 Görüntü Veriseti(Dataset)

Çalışmada kullanılan veri kümesi tasarlanan gerçek saha prototipi üzerinde çekilen videolardan elde edilen görüntüler kullanılarak oluşturulmuştur. Aynı zamanda oluşturulan veri setinde yanlış etiketlenmiş bazı görüntüler elenerek her bir sınıf için en küçük kenarı 240 piksel olacak şekilde görüntü elde edilmiştir. Bu görüntüler RGB formatında, toplamda 3600 görüntüden oluşan bir veri kümesini meydana getirmiştir. Daha sonra bu veri kümesi, eğitim ve test olarak gruplandırılmıştır. Gol olayını gösteren pozitif küme toplam 2600 görüntüden oluşurken, negatif kümesinde ise 1000 adet görüntü bulunmaktadır. Pozitif ve negatif kümelerinde kullanılan 2600 ve 1000 örnek sayıları, akan videodan en uygun çerçevelerin seçilmesi ile elde edilmiştir. Gol olayını gösteren pozitif kümedeki görüntü sayısı en optimum eğitim ağı oluşturmak için daha fazla belirlenmiştir. Şekil 8'de veri kümemizdeki kullanılan topun farklı açılardan elde edilmiş görüntüleri görülmektedir.

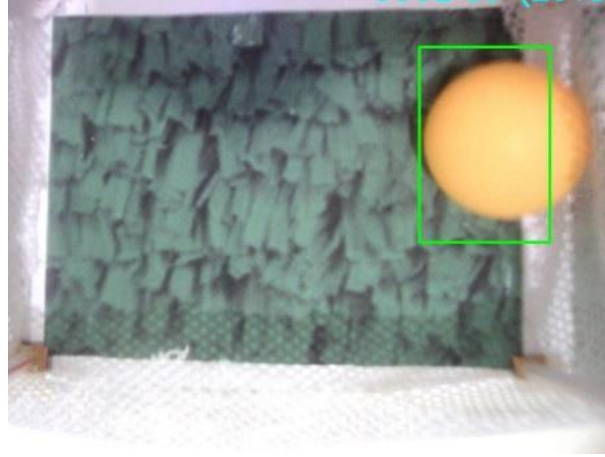


Şekil 8. Görüntü verisetinden farklı açılardan elde edilmiş top görüntüleri

3.4 Veri İşleme ve Topun Belirlenmesi(Data Processing and Detection Ball)

Elde edilen fotoğraflar ile oluşturulan veri kümesi üzerinden yapılacak Haar Cascade eğitimlerinden daha iyi sonuçlar almak adına veri kümesinde bulunan fotoğraflar bir takım ön işlemlere tabi tutulmuştur. Bu işlemleri bütün fotoğrafa uygulamak yerine, fotoğraftaki top kısmı belirlenip merkezlenerek kare şeklinde kırpılmıştır. Daha sonra ise "140*140" ve "155x130" piksel aralığında olacak şekilde tekrar boyutlandırılmıştır. Tüm bu işlemler Python ortamında gerçekleştirilirken, top belirleme için ise Viola-Jones algoritması kullanılmıştır. Viola-Jones algoritması yüksek performansı ile en çok kullanılan nesne belirleme yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Şekil 9’da görüldüğü gibi topu belirlemek için dikdörtgen özellikleri kullanılmaktadır. Bu sayede topun oldukça hızlı belirlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca daha sonra oluşturulan ağın performansını yükseltmek adına veri çoğaltma yapılarak, veri kümesinde bulunan fotoğraflar, görüntü işleme teknikleri ile daha düşük ve daha yüksek parlaklık ve kontrast değerleri altında düzenlenip tekrar kaydedilerek, eğitim verisi artırılmıştır.



Şekil 9. Veri işlendikten sonra topun belirlenmesi

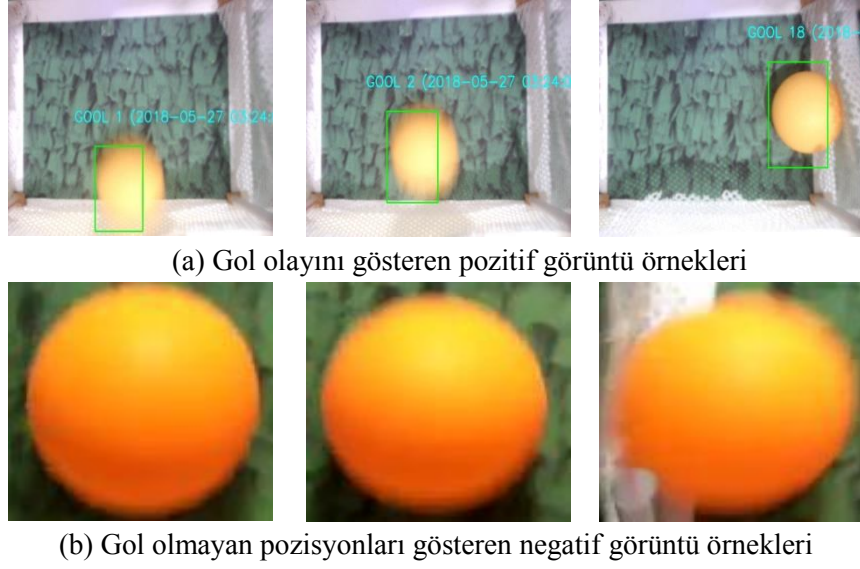
4. ÖNERİLEN SİSTEM: GolKaSis (PROPOSED SYSTEM: GolKaSis)

Çalışmada önerilen GolKaSis için Şekil 10’da görüldüğü gibi bir futbol sahası prototipi oluşturulmuştur. Tasarlanan prototipte gol olayının tespit edilebilmesi amacıyla ceza sahası bölgesi gerçek bir futbol sahasının ölçüleri dikkate alınarak ölçeklendirilmiştir. Sistemde kameralar yardımıyla topun görüntüleri çerçeveler haline alınarak bilgisayarlı görü sistemine aktarılmaktadır. Gerçekleştirilen sistemde yapılan denemeler sonucunda, kameranın yerden yüksekliğinin en uygun video çekimlerinin elde edilebilmesi için 24 cm olması gerektiği belirlenmiştir. Sistemde verisetinin oluşturulması için veri tabanına topun tüm açılarından gösteren görüntüler kaydedilmektedir.



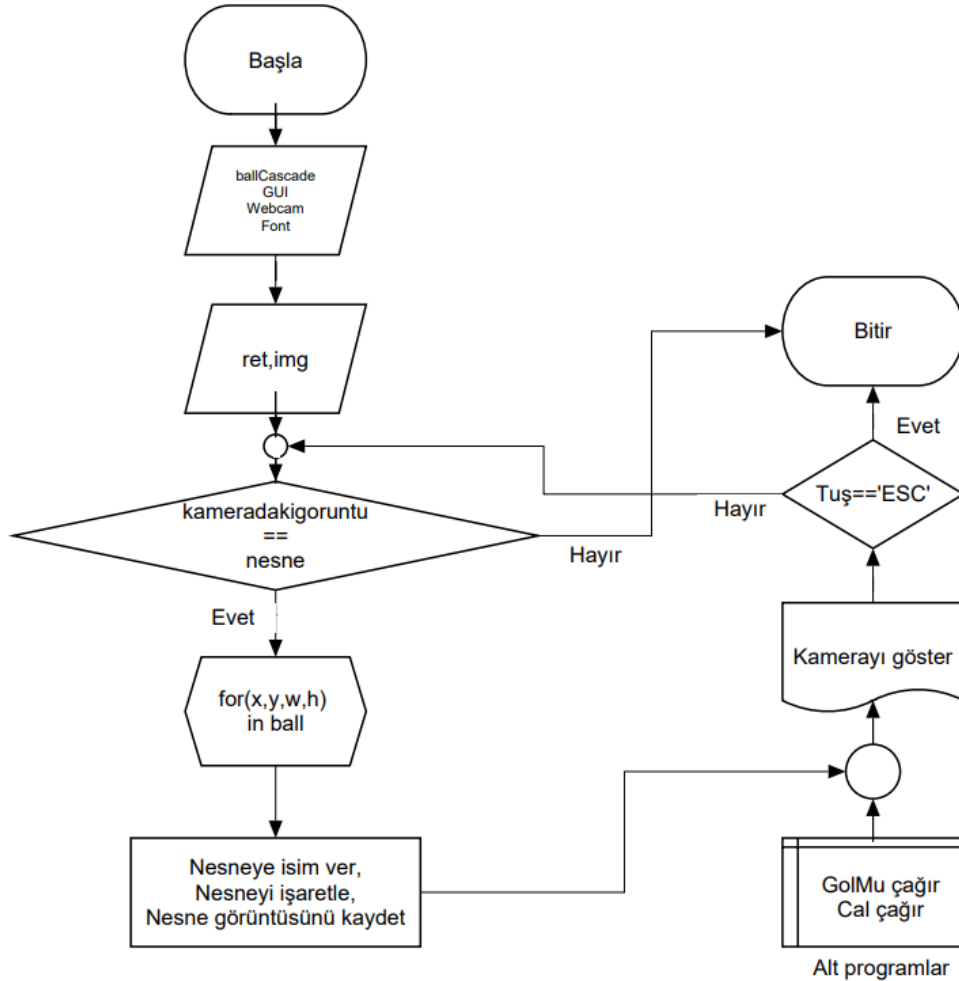
Şekil 10. Tasarlanan bilgisayarlı görü destekli saha prototipi

Geliştirilen sistemin Haar Kaskad sınıflandırıcı için eğitim ve test aşamalarında kullanılan gol olayını gösteren pozitif görüntü örnekleri ve gol olmayan negatif örneklere ait olan görüntüler Şekil 11(a) ve (b)’de gösterilmiştir. Ayrıca görüntülerin bazılarının hareket halinde elde edilerek bulanık olması sağlanarak sistemin daha tutarlı çalışması sağlanmıştır.



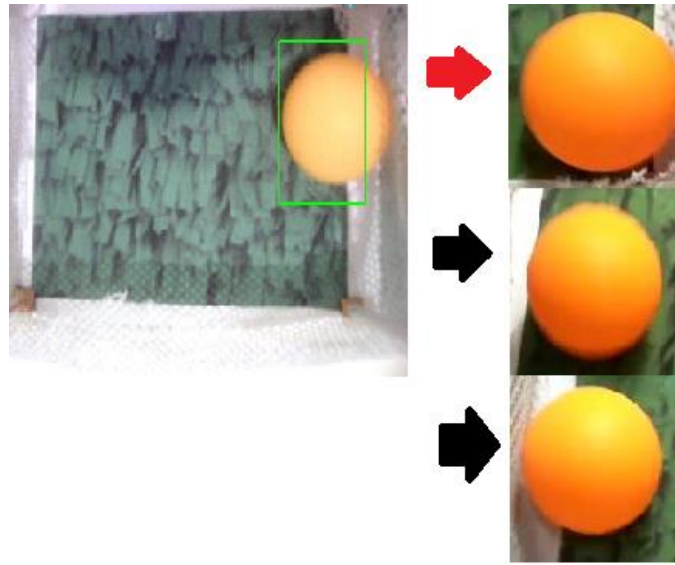
Şekil 11. Futbol topuna ait pozitif ve negatif görüntü örnekleri (a) pozitif, (b) negatif

Sistemin çalışmasını gösteren akış şeması Şekil 12’de sunulmuştur. Bu akış şemasından da görüleceği üzere, öncelikle video çerçevesi içerisinde topun olup olmadığı belirlenmektedir. İlgili çerçevede top olduğu tespit edildikten sonra, topun kale çizgisi ile olan konumu sorgulanmaktadır. Kale çizgisini geçip geçmediği Haar sınıflandırıcı ile daha önce oluşturulan eğitim kümesi karşılaştırılarak gol olayının gerçekleşip, gerçekleşmediği GolMu fonksiyonunun içeriğindeki yapıların işletilmesi ile kestirilmektedir.



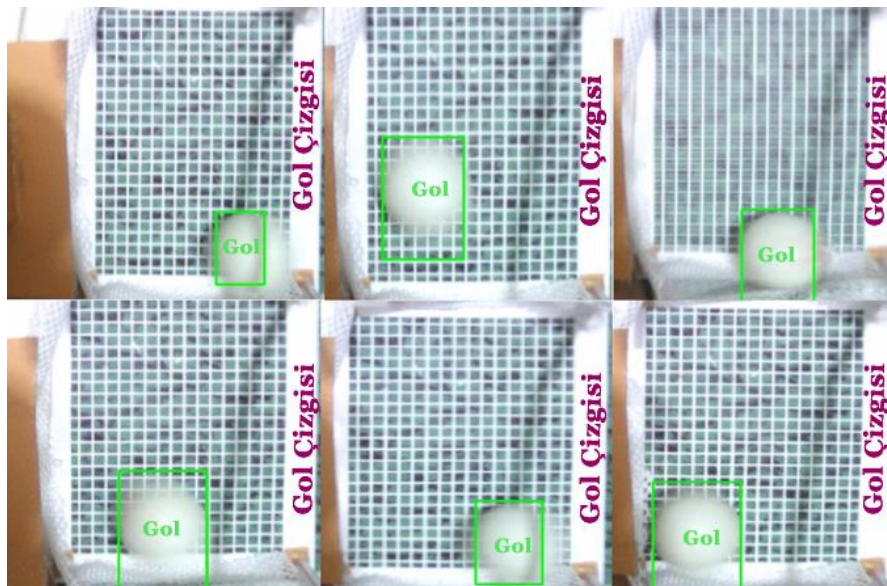
Şekil 12. Tasarlanan sistemin çalışmasını gösteren akış diyagramı

Çalışmada veriseti oluşturulduktan sonra uygun bir konuma yerleştirilen kamera aracılığıyla alınan videonun çerçeve görüntüleri alınarak veri tabanında benzer görüntünün var olup olmadığı kontrol edilmektedir. İlk olarak alınan görüntüden topun bölgesi belirlenerek topun çevresi eşitlenir. Bu aşamadan sonra, Haar Kaskad işlemleri ile kontrol işlemleri gerçekleştirilir. Topun kameranın görüş açısında olduğu sürece nesnenin kayıt işlemleri gerçekleştirilir. Nesneye isim ataması yapılır ve nesnenin görüntüsü veri tabanına kaydedilir. Son aşamada ise kullanıcının görebileceği şekilde verilere raporlanarak kayıt altına alınır. Eğer sistemde bir eşleşme sağlanırsa, nesneye isim verilip, işaretlenip ve kaydedilir. Şekil 13’de görülebileceği gibi top anlık olarak kamera açısına girdiğinde XML dosyasındaki eğitim verisiyle eşleştirmede top işaretlenmesi sağlanır ve gol olayı belirlenir. XML dosyasının içerisinde topun belirlenmesi ile gol olan ve olmayan pozisyonlara ait çerçevelerin bilgileri tutulmaktadır.



Şekil 13. Pozitif klasöründeki verilerle karşılaştırma (XML dosyasıyla karşılaştırma)

Şekil 14’te ise GolKaSis ile bazı gol olaylarına yönelik örnek görüntü kolajı gösterilmiştir. Kamerada top görünmeye başladığı andan itibaren top belirlenmekte ve bilgisayarlı görü tarafından top çizgiyi tamamen geçtiği anda gol olayının tespiti gerçekleştirilmektedir. Sistem üzerinde gerçek zamanlı yapılan test işlemlerinde sistemin başarılı bir şekilde gol olayını tespit ettiği görülmüştür.



Şekil 14. Kamera tarafından alınan görüntülerin kolajı

Çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda, 2600 pozitif(gol) ve 1000 negatif (gol değil) olmak üzere toplamda 3600 video çerçevesinin %70'i eğitim aşamasında, %30'u ise test aşamasında kullanılmıştır. Böylece test kümesi için 780 pozitif, 300 negatif örüntü olmak üzere toplamda 1080 örnek oluşturulmuştur. Yapılan test işlemi sonucunda elde edilen sonuçları gösteren karmaşıklık matrisi Tablo 1'de sunulmuştur. Bu çizelgeden de görüleceği üzere, toplam 1080 örnek üzerinde 983 adet örnek doğru sınıflandırılarak %91 sınıflandırma başarımı elde edilmiştir.

Tablo 1. Test veri kümesine ait karmaşıklık matrisi sonuçları

		Tahmin Sonuçları	
		Pozitif	Negatif
Gerçek Sonuçlar	Pozitif	693 (Doğru Pozitif)	87 (Yanlış Pozitif)
	Negatif	10 (Yanlış Negatif)	290 (Doğru Negatif)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, gelişen teknoloji ile birlikte futbol sahalarında topun çizgiyi geçip geçmediği ile ilgili temel bir bilgisayarlı görü sistemi(GolKaSis) tasarlanmıştır. Sistemde öncelikle, tasarlanan futbol sahası prototipinde uygun bir bölgeye yerleştirilen kameradan elde edilen videolardan alınan görüntüler negatif ve pozitif olarak ayrılmıştır. Bu görüntülerden pozitif olanlar gol olayını gösterenlerden, negatif olanlar ise gol olayının meydana gelmediği video görüntülerinden oluşmaktadır. Geliştirilen bilgisayarlı görü sisteminde gerçek zamanlı alınan video görüntüleri ile pozitif görüntülerin eşleştirilmesi ise Haar Kaskad Sınıflandırıcı sağlanarak gol olayı tespit edilmektedir. Tasarlanan prototip üzerinde yapılan test işlemlerinde önerilen bilgisayarlı görü sisteminin gol olayını %91 başarımla doğru olarak tespit ettiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada, videolardan elde edilen görüntülerdeki ışık şiddetinin gol olayının doğru olarak tespit edilmesine etkisi olduğu görülmüştür. Bu nedenle kullanılan kameranın özellikleri de göz önüne alınarak ışık şiddetinin uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında daha gerçek bir futbol sahası üzerinde alınan videolardan gol olayının tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca derin öğrenme yöntemleri gibi farklı algoritmalar ile de sistemin karşılaştırmalarının yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Psiuk R., Seidl T., Strauß W., Bernhard J. Analysis of goal line technology from the perspective of an electromagnetic field based approach. *Procedia Engineering*, 72(279-284), (2014).
- [2] Peker M., Özkaraca O. Büyük ölçekli veri setleri için GPU hızlandırılmalı melez bir GA-SVM: Cu-GA-SVM. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6:3(581-591), (2018).
- [3] Reid I., Zisserman A. Goal-directed video metrology. *4th European Conference on Computer Vision '96*, Cambridge, (April 1996).
- [4] Ancona N., Cicirelli G., Branca A., Distanto A. Goal detection in football by using support vector machines for classification. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'01)*, 1(611-616), (2001).

- [5] Chen S. C., Shyu M. L., Zhang C., Luo L., Chen M. Detection of soccer goal shots using joint multimedia features and classification rules. *MDM/KDD '03*, Washington, DC, USA, (2003).
- [6] Wan K., Yan X., Yu X., Xu C. Real-time goal-mouth detection in MPEG soccer video. *Proceedings of the eleventh ACM international conference on Multimedia*, (pp. 311-314), (2003).
- [7] D'Orazio T., Leo M., Spagnolo P., Nitti M., Mosca N., Distanti A. A visual system for real time detection of goal events during soccer matches. *Computer Vision and Image Understanding*, 113:5(622-632), (2009).
- [8] Yang Y., Lin S., Zhang Y., Tang S. Highlights extraction in soccer videos based on goal-mouth detection. *9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA 2007)*, (pp. 1-4), (2007, February).
- [9] Shi P., Yu X. Q. Goal event detection in soccer videos using multi-clues detection rules. *International Conference on Management and Service Science (MASS'09)*, (pp. 1-4), (2009, September).
- [10] Khatoonabadi S. H., Rahmati M. Automatic soccer players tracking in goal scenes by camera motion elimination. *Image and Vision Computing*, 27:4(469-479), (2009).
- [11] Gao X., Niu Z., Tao D., Li X. Non-goal scene analysis for soccer video. *Neurocomputing*, 74:4 (540-548), (2011).
- [12] Spagnolo P., Leo M., Mazzeo P., Nitti M., Stella E., Distanti A. Non-invasive soccer goal line technology: A real case study. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* (pp. 1011-1018), (2013).
- [13] Ryall E. Are there any Good Arguments Against Goal-Line Technology?. *Sport, Ethics and Philosophy*, 6:4(439-450), (2012).
- [14] ScienceABC, <https://www.scienceabc.com/innovation/how-does-the-goal-line-technology-work.html>, Erişim Tarihi: 04/12/2018.
- [15] FIFA Goal-line Technology, Recommendations for implementation in competitions based on experience from the FIFA Club World Cup Japan 2012, <https://www.fifa.com/mm/document/fifaqualityprogramme/goallinetechology/02/01/77/01/gltweben.pdf>, Erişim Tarihi: 02/12/2018.
- [16] physics.org, <http://www.physics.org/article-questions.asp?id=125>, Erişim Tarihi: 02/12/2018.
- [17] Sky Sports <https://www.skysports.com/football/news/11095/11395534/var-at-the-world-cup-when-can-video-assistant-referees-be-used-will-fans-be-informed-of-decisions>, Erişim Tarihi: 02/12/2018
- [18] Eldem A., Eldem H., Palalı A. Görüntü İşleme Teknikleriyle Yüz Algılama Sistemi Geliştirme. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6:2(44-48), (2017).
- [19] Viola P., Jones M. J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 57:2(137-154), (2004).
- [20] Wilson P. I., Fernandez J. Facial feature detection using Haar classifiers. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 21:4(127-133), (2006).
- [21] Cascade Trainer GUI, <http://amin-ahmadi.com/cascade-trainer-gui/> Erişim Tarihi: 02/12/2018.
- [22] Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001 (CVPR 2001). Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on (Vol. 1, pp. 1-1)*, (2001).



Akıllı Şebekelerde Rassal Modelleme ile Enerji Depolama Sistemi Kapasite Hesaplaması

İslam Şafak BAYRAM^{1,*}

¹Hamad Bin Khalifa Üniversitesi, Mühendislik ve Bilim Fakültesi, Sürdürülebilir Kalkınma Bölümü, 34110, Doha/Katar

Öz

Dünyada elektrik sektörü, hızla entegrasyonu artan yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretiminden kaynaklanan karbon ayak izini azaltmaya yönelik yapılan çevresel ve ekonomik baskılar ile karşı karşıya gelmektedir. Enerji depolama sistemleri şebeke altyapı güvenliğini arttıran, şebekeye çalışma esnekliği sağlayan ve çevresel etkileri azaltan çözümler olarak büyük ilgi görmektedir. Bu nedenle, enerji depolama sistemleri kompleks elektrik şebeke operasyonlarında anahtar rol oynamaktadır. Bu makalede, tüketicilerin elektrik talepleri, elektrik şebekesinden çekilen güç ve enerji depolama ünitesinden oluşan bir sistem için Stokastik bir model sunulmaktadır, sistem parametreleri arasındaki etkileşimler incelenmiştir. Enerji depolama sisteminin onlarca meskenden oluşan rezidans, villalardan oluşan site veya kampüs gibi yerlerde bir grup kullanıcı tarafından ortaklaşa kullanıldığı varsayılmaktadır. Geliştirilen Stokastik model, iki boyutlu sürekli Markov zinciri tabanlı olup, sistem durumlarının rassal dağılımları nümerik metotlar ile hesaplanmıştır. Dikkate alınması gereken diğer bir husus ise, enerji depolama sisteminin yoğun zamanlarda pik talebi azaltmak için kullanılması ve müşteri talebinin azaldığı dönemlerde ise şebeke gücü tarafından iskontolu elektrik enerjisi ile doldurulmasıdır. Şebeke güvenliğinin sağlanması için müşteri talepleri, sınırlı miktardaki şebeke elektriği ve enerji depolama ünitesi tarafından karşılanmakta ancak bu seviyenin üstündeki taleplere cevap verilememektedir. Bu nedenle kesinti olasılığı doğal olarak sistem performans değerlendirme parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji depolama sistem kapasitesi, değişen kesinti olasılıkları ve sistem parametreleri altında hesaplanmıştır. Sunulan hesaplamalara göre enerji depolama sistemi optimum kapasitesinin belirlenmesinde tüketici talep istatistiklerinin büyük önem taşıdığı ortaya konulmuştur. Son olarak, geliştirilen ekonomik fayda modeli ile sistem parametreleri ekonomik değişkenlerle ilişkilendirilip, sistem operatörüne finansal dinamikleri göz önüne alan en iyi çalışma aralığını seçmesine olanak sağlamaktadır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 18/12/2018
Düzeltilme: 01/02/2019
Kabul: 04/02/2019

Anahtar Kelimeler

Akıllı Şebekeler
Enerji Depolama Sistemleri
Stokastik Modelleme

Keywords

Smart Grids
Energy Storage Systems
Stochastic Modeling

A Stochastic Energy Storage Capacity Sizing in Smart Grid

Abstract

Electric power sector around the world is facing challenges with rapidly increasing penetration of variable renewable energy as well as environmental and economic pressure to lower the carbon footprint of electricity production. Energy storage systems receive a lot of attention as they present attractive solutions to improve grid reliability, provide grid flexibility, and lower the environmental impacts. To that end, energy storage systems are expected to be key instruments in complex power system operations. In this paper, we present a quantitative stochastic model to examine the interactions of customer demand, power grid, and an energy storage unit that is shared by a group of users such as multi-dwelling units and campuses. The stochastic model is based on a two-dimensional continuous-time Markov chain and steady-state probability distributions are solved by numerical methods. The goal is to present a general architecture which advances modeling efforts for smart power grid systems. It is noteworthy that the ESS is discharged during peak hours to reduce peak consumption, and it is charged during off-peak hours to store cheap energy. In order to ensure grid reliability, system serving capacity is limited to available resources and a small percentage of customer demand is rejected which serves as the performance metric of the model. Energy storage sizing is performed under various rejection probabilities and system resources. The results reveal that obtaining the right size of energy storage system is highly related to customer's electricity consumption patterns. Finally, an economic profit model which relates financial principals with stochastic system parameters and enables system operator to choose the best operating range for the system.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçtiğimiz son on yılda, dünyanın birçok ülkesinde elektrik şebeke altyapılarında geniş kapsamlı iyileştirme ve geliştirme çalışmalarına başlanmıştır [1]. Bu çalışmaların temel nedenleri ekonomik, çevresel ve politik olup şöyle sıralamak mümkündür. İlk olarak, dünya üzerindeki birçok elektrik şebekesi bir asra yakın süredir çalışmakta olup, birçok şebeke elemanı çalışma ömürlerini tamamlamaktadır. Buna ek olarak özellikle dağıtım şebekeleri halen onlarca yıl önceki çalışma prensiplerini takip etmektedirler. Ayrıca, haberleşme ve güç ölçümü ekipmanlarından da mahrumdurlar. Dolayısıyla, sistem operatörleri şebekenin gerçek zamanlı durumu hakkında bilgi sahibi olamamaktadırlar. Bu nedenle elektrik kesintileri önlenememekte ve ülke ekonomilerini milyarlarca lira zarara uğramaktadır [2]. Diğer bir husus ise, birçok ülkedeki karar alıcı mercilerin hem enerjide dışa bağımlılığı hem de elektrik sektörünün karbon ayak izini azaltmayı hedefleyerek, yenilenebilir enerji kaynaklarını elektrik şebekelerine yükselen hızla entegre etmeye başlamalarıdır [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen fotovoltaik ve rüzgâr sistemlerinin çıkış gücü meteorolojik parametrelere bağlı olması sebebi ile bu sistemlerin elektrik üretimindeki ani değişiklikler şebekenin arz-talep dengesini olumsuz yönde etkilemektedir [4] [5]. Yukarıda belirtilen problemlerin çözümünde önemli rol oynayacak akıllı şebeke ekipmanlarından birisi de enerji depolama sistemleridir. Bu makalede, Stokastik modelleme yöntemi ve Markov zincirlerini kullanarak müşteri talep modellemesi ve sistem kapasite hesaplaması için matematiksel bir çerçeve sunulmaktadır.

Global perspektifte, enerji depolama sistemleri şebeke operasyonlarına esneklik sağladığı için kendisine birçok uygulama alanı bulmuştur [6]. Örneğin, mesken tipi elektrik tüketicilerinin elektrik talepleri, hızla yaygınlaşan iklimlendirme sistemleri ve çoğalan elektronik alet kullanımına paralel olarak artmaktadır. Ayrıca, kullanıcıların gün içindeki aktivitelerine bağlı olarak farklı saat dilimlerinde elektrik tüketim seviyeleri arasında oluşan ciddi farklar, serbest elektrik piyasasındaki fiyatlamaları etkilemektedir [7]. Bu nedenle, akıllı elektrik sayacı ve geri bildirim mekanizmalarının kullanımında hızla artış görülmekte ve kullanıcılara dinamik ve zamana bağlı fiyatlama ile direk yük kontrolü gibi uygulamalar sunulmaktadır [8]. Enerji depolama sistemleri, elektrik fiyatlarının ucuz olduğu zamanlarda şarj edilip, elektrik tarifelerinin yükseldiği saat dilimlerinde deşarj edilerek pik elektrik tüketimini azaltmak için kullanılabilir. Ayrıca, meskenlerin çatılarında kurulabilecek fotovoltaik sistemler ile depolanan enerji piyasaya daha yüksek fiyattan satılıp kullanıcılar tarafından ekonomik kazanç elde etmek mümkün hale gelmektedir [9].

Elektrik şebekelerinin icadı ve yaygınlaşması, sağlık, haberleşme ve ulaşım gibi önemli sektörlerin gelişimine olanak sağlamış olması nedeniyle, Ulusal Amerikan Mühendisler Akademisi tarafından geçtiğimiz yüzyılın en önemli mühendislik başarısı olarak kabul edilmiştir [10]. Elektrik şebekelerini diğer arz-talep sistemlerinden ayıran en önemli özelliği, geniş alanlara yayılmış milyonlarca müşteri taleplerini gerçek zamanlı olarak karşılamasıdır.

Elektrik şebekesi yatırımlarının yüksek maliyetli olması nedeni ile sistem planlaması ve operasyonu büyük önem taşımaktadır. Akıllı şebeke sistemlerinin en önemli birleşenlerinden birisi enerji depolama sistemleridir. Bu sistemler yüksek maliyetleri yüzünden geçtiğimiz yıllara kadar çok az oranda kullanım imkânı bulmuştur. Örneğin 2016 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) enerji depolama kapasitesi toplam enerji üretim kapasitesinin sadece 50'de 1'i kadar iken, Avrupa Birliği Ülkelerinde 10'da 1'i ve Japonya'da 8'de 1'dir [11]. Önemli olan diğer bir husus ise, bu depolama kaynaklarının önemli bir miktarı geniş kapasite (1MWh ve üzeri) sistemleridir (ör. sıkıştırılmış hava ile enerji depolama). Diğer bir yandan, düşük boyutlu enerji depolama sistemlerinin kullanımı, özellikle Lityum iyon gibi elektrokimyasal depolama sistemleri, azalan birim maliyetleri, kullanıcılara sunulan teşvikler, yenilenebilir enerji sistemlerine entegrasyonu ve enerji piyasalarına katılabilme imkânı sayesinde, hızlı artış göstermektedir. Örneğin ABD Enerji Bakanlığına göre 2013 ve 2017 yılları arasında enerji depolama sistemlerinin kullanımı %174 oranında artmıştır [11].

Enerji depolama sistemlerin planlaması ve boyutlandırılması son yıllarda birçok akademik çalışmanın konusu olmuştur. Başlıca referans kaynakları ise şu şekilde sıralanabilir: [12] [13] [14] [15]. Bu çalışmalardan [12] nolu referansta, bir grup mesken tipi müşterilerin fotovoltaik sistemlere ve ortak (paylaşılan) enerji depolama sistemlerine sahip oldukları kabul edilerek lineer optimizasyon yöntemi ile sistem maliyetlerini minimize eden enerji depolama sisteminin boyu hesaplanmıştır.

Arghandeh ve arkadaşlarının [13] nolu kaynakta sundukları çalışmada ise bir grup elektrik tüketicisi tarafından ortaklaşa kullanılan enerji depolama sistemi ele alınmıştır. Bu çalışmada, enerji depolama sistemi tüketicilere kesinti anlarında kaynak güç sağlama ve yoğun elektrik tüketimi zamanlarında masrafların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bunun yanında, enerji depolama sisteminin elektrik piyasalarına gerçek zamanlı katılmasına olanak sağlayacak gerçek zamanlı kontrol mekanizması geliştirilmiştir.

Benzer bir şekilde, [14] nolu çalışmada İngiltere’de 0’dan 100’e kadar değişen sayıdaki meskenlerde oturan elektrik tüketicilerinin ortaklaşa kullanılan enerji depolama sistemi, güneş enerjisi üretimi ve zamana bağlı fiyatlandırma yönteminden oluşan bir senaryoda, enerji depolama sistemlerinin kullanıcılara sağladığı ekonomik faydalar araştırılmıştır. Bu çalışmada ortaklaşa kullanılan enerji depolama sistemleri sayesinde kişi başı kullanım maliyeti bireysel depolama sistemi satın alma senaryosu ile karşılaştırıldığında, %56’ya kadar maliyet indirimi sağlandığı gösterilmiştir.

[15] nolu çalışmada ise, önceki örneklerde olduğu gibi, bir grup tüketici tarafından kullanılan enerji depolama sistemine ek olarak akıllı ve programlanabilen ev aletleri ile fotovoltaik sistemleri ele alınmıştır. Enerji depolama sistemleri, güneş enerjisi üretimi ile elektrik tüketimi arasındaki zaman farkını azaltıp, şebekeden pahalıya alınan elektrik maliyetinin düşmesine neden olmuştur. Birim elektrik tüketim maliyetleri ele alındığında, enerji depolama ünitesinin sistem maliyetini %22 ila %30 arasında düşürdüğü görülmüştür.

Stokastik modelleme, kuyruk teorisi ve Markov zincirleri akıllı şebeke sistemlerinde son yıllarda kullanılmaya başlanan önemli matematiksel yaklaşımlardır [16, 17]. Örneğin [14] nolu çalışmada ayrıklı zamanlı Markov zincirleri kullanılarak enerji depolama sistemi modeli çıkartılarak güneş paneli tarlalarında kapasite kullanımı hesaplanmıştır. Bu makalede sunulan modele yakın olarak [17] nolu çalışmada, Markov zincirleri vasıtasıyla kesinti olasılığı performans metriği olarak kullanılmış ve mikro şebeke sistemlerinde bulunan enerji depolama sisteminin kapasite hesabı yapılmıştır. [18] nolu referansta ise, Markov zincirleri ve kuyruk teorisi kullanılarak elektrikli araçların yük talepleri modellenmiş ve hızlı şarj istasyonlarında bekleme sürelerini düşürmek için araçlar için hedef şarj etme limiti belirlenmiştir.

2. RASSAL MODELLEME (STOCHASTIC MODELLING)

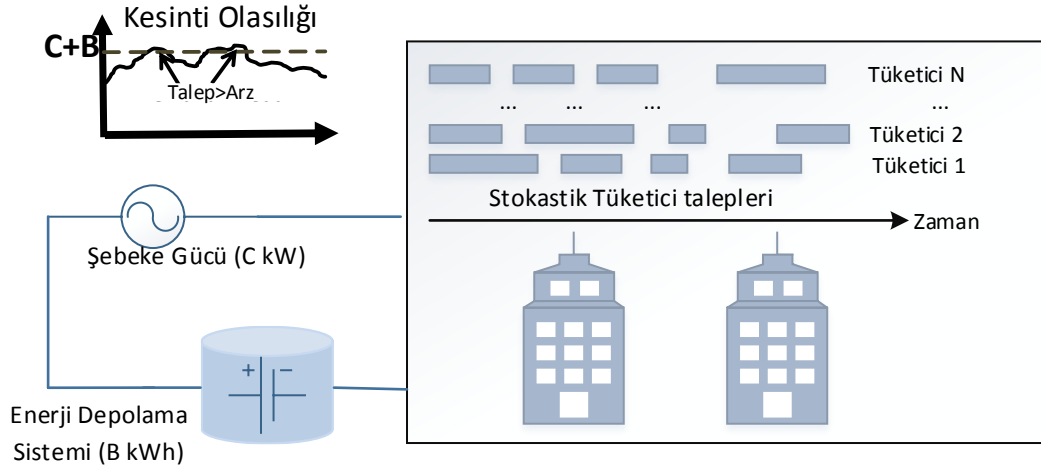
A. SİSTEM TANIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Bu çalışmada gittikçe artarak ilgi gören akıllı şebeke uygulamalardan birisi olan ve bir grup tarafından paylaşılan enerji depolama sistemleri ele alınmaktadır. Bu tür uygulamalarda, büyük rezidanslar ve üniversite kampüsleri gibi bir arada bulunan elektrik tüketicilerinin talepleri, enerji depolama sistemleri ve elektrik şebekesinden gelen güç ile karşılanmaktadır. Bu yol ile özellikle kilovat başına olan talep masrafları azaltılmakta, elektrik şebekeleri dalgalanan müşteri taleplerinden korunmakta ve sistem arz güvenliği sağlanmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının bağlanması ve çok zamanlı elektrik tarifesi olması durumunda, kullanıcılar tarafından tasarrufu yapabilmektedir.

Enerji depolama sistemlerinin boyut hesaplanmasında literatürde iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan birincisinde, enerji depolama sisteminin spesifik bir proje (ör. Güneş veya rüzgar tarlası, mikro şebeke) için olduğu varsayılmakta, ve birçok sistem parametresinin (yüksek çözünürlüklü elektrik tüketim, güneş enerjisi, elektrik fiyatları vs.) en az 12 aylık dönem için, ölçüm yoluyla elde edilmesi gerekmektedir. Daha sonra, optimizasyon yöntemleri ile düşük maliyet, yüksek getiri esasına bağlı olarak kapasite hesaplaması yapılmaktadır. İkinci gruptaki yaklaşımlar ise, Markov zinciri tabanlı rassal modelleme yöntemleridir. Bu yöntemler proje-spesifik ölçümlerin olmadığı zamanlarda, değişen sistem parametrelerine (ör. istatistiksel müşteri talepleri, şebekeden çekilen güç vb.) göre enerji depolama sistem boyutunun hesaplanmasına izin vermektedir. Bu tür yöntemler yüksek maliyetli akıllı şebeke projelerinin planlanması aşamasında, sistem operatörlerine önemli bilgiler vermektedir. Akıllı şebekeler disiplinler arası çalışma alanlı olmasından dolayı sunulan yaklaşım, endüstri mühendisliği, elektrik mühendisliği ve ekonomi alanlarını kapsayan bir yaklaşımdır.

Bu makalede sunulan sistemin operasyon prensipleri şöyle sıralanmıştır. İlk olarak enerji depolama sisteminin N sayıda tüketiciler tarafından kullanılması ve bu kullanıcıların toplam yüklerinin tipik mesken

seviyesinden çok daha fazla olmasından dolayı, bu tür kullanıcıların ticarethane veya sanayii grubuna girdikleri varsayılmaktadır. Dünyanın birçok yerinde elektrik sağlayıcısı şirketler tarafından bu tip müşterilerin az değişen tüketimlerinden dolayı iskontolu tarifeler uygulanmaktadır. Bu yüzden sistemin şebekeden sabit güç çektiği varsayılmaktadır. İkinci olarak, enerji depolama sistemi pik zamanlarda müşteri taleplerini karşılamak için kullanılmakta, diğer zamanlarda ise şebekeden çekilen güç ile şarj olmaktadır.



Şekil 1 Sistem modelinin şematik görünümü

Son olarak, tüm sistem kaynaklarının kullanımda olması durumunda, müşteri talebi arzdan fazla olacağından yeni talepler karşılanamamaktadır. Bu durumda, müşteri taleplerinin başlama ve bitiş zamanlarının olasılıksal olduğu göz önünde bulundurulduğunda kesinti olasılığı doğal olarak sistemin performansı ölçme birimi olarak karşımıza çıkmaktadır. Tarif edilen sistemin şematik görünümü Şekil 1 de gösterilmiştir.

B. SİSTEM PARAMETRELERİ (SYSTEM PARAMETERS)

Bu makalede sunulan olasılıklı modelin parametreleri şöyle tanımlanabilir: Sistem şebekeden C kW güç çekmekte olup ve enerji depolama sisteminin büyüklüğü B kWh'tır. Müşteri elektrik taleplerinin sisteme ulaşması olasılıklı olup, Poisson sürecini α parametresiyle modellenmektedir. Bu varsayımın birçok makalede yaygınca yer almasının nedeni müşteri taleplerinin birbirlerinden bağımsız şekilde modellenmesine imkân sağlamasıdır [19] [20]. Benzer şekilde sisteme ulaşan her talebin aktif olma sürecinin olasılıklı bir dağılım olan Üstel dağılıma uyduğu varsayılmaktadır. Bu dağılımın parametresi ise β ile ifade edilmektedir. Son olarak enerji depolama sisteminde bir müşteri talebine denk gelen miktarın şarj edilmesi de Üstel olasılıklı olup γ parametresi ile ifade edilmektedir [21] [22].

İkili bir değişken olan z_t^i , i nolu tüketicinin herhangi bir t zamanındaki durumunu gösterir ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$z_t^i = \begin{cases} 1, & \text{tüketici } i \text{ aktif} \\ 0, & \text{tüketici } i \text{ aktif değil} \end{cases} \quad (1)$$

Bu durumda, i endeksi ile gösterilen herhangi bir tüketicinin herhangi bir t zamanında aktif veya aktif olmama olasılığı aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\mathbb{P}(z_t^i = 1) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad (2)$$

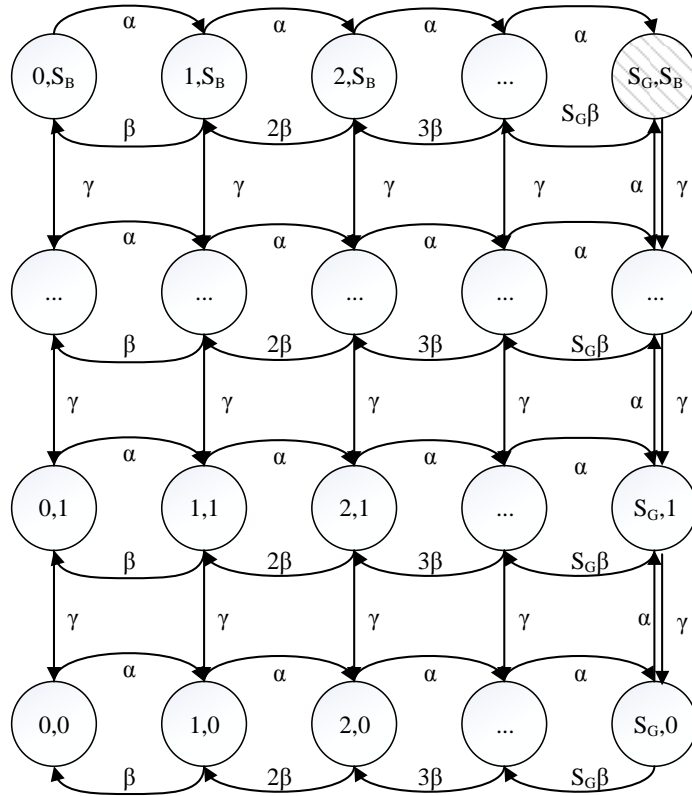
ve,

$$\mathbb{P}(z_t^i = 0) = \frac{\beta}{\alpha + \beta}. \quad (3)$$

Tüketici i 'nin herhangi bir t zamanındaki toplam yükünü L_t^i ve enerji depolama sisteminin herhangi bir t zamanındaki şarj seviyesini de $S_c(t)$ değişkenleri ile tanımlanmıştır. Bu durumda, enerji depolama sisteminin şarj seviyesinin zamana göre değişimi t parametresine göre türev alınarak bulunur ve $\frac{dS_c}{dt}$ ile ifade edilir. Bu halde, şarj seviyesi aşağıda belirtilmiş olan üç farklı durum ile karşılaşır:

- Eğer enerji depolama sistemi tamamen şarj edilmiş durumda ve tüketici talebi şebekeden çekilen güçten daha az durumda ise, enerji depolama sisteminin şarj seviyesi değişmemektedir ($\frac{dS_c}{dt} = 0$).
- Eğer enerji depolama sistemi tamamen boş seviyede ve tüketici talebi de şebekeden çekilen güçten daha fazla ise, enerji depolama sisteminin şarj seviyesi değişmemektedir ($\frac{dS_c}{dt} = 0$).
- Enerji depolama sisteminin şarj seviyesi %0 ile %100 arasında herhangi bir seviyede ise, şarj seviyesinin değişimi $\frac{dS_c}{dt} = \eta(C - \sum_i L_t^i)$ hızında negatif veya pozitif olarak gerçekleşmektedir.

Yukarıdaki denklemdeki η katsayısı enerji depolama sisteminin şarj dolmuş-boşalmı verimini göstermekte olup, genelde 0.8 ila 0.95 arasında bir değerde bulunmaktadır. Bu katsayının bir çarpan görevi görmesi ve matematiksel denklemlerde yazım kolaylığı sağlamak için ileriki adımlardaki gösterimlerden çıkarılmıştır. Hesaplamaların sonunda elde edilen değer η katsayısı ile normalize edilip gerçek sonuca ulaşmak mümkün olacaktır.



Şekil 2: İki boyutlu sürekli Markov zincir modeli

Tekrar hatırlatmak gerekir ise, bu makalede sunulan sistemde tüketici elektrik taleplerinin sınırlı olan enerji depolama ve elektrik şebekesi kaynaklarından karşılanmalıdır. Göz önünde bulundurulması gereken bir husus ise, müşteri talebinin sistem kaynaklarını aşması halinde, yeni talepler karşılanamamakta ve kesinti meydana gelmektedir. Bu sebeple bu makalenin temel amacı çok küçük miktardaki müşteri taleplerini reddederek enerji depolama sisteminin boyunu hesaplamaktır. Matematiksel olarak bu problem aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && B \\ & \text{s. t.} && \mathbb{P}(S_c(t) > B) \leq \delta \end{aligned} \quad (4)$$

Yukarıdaki problemi efektif olarak çözebilme için şu metod sunulmuştur. Sistemdeki her bir tüketicinin talebini D ile gösterilmiş ve sistem kaynakları bu parameter ile diskrit hale getirilmiştir

$$S_G = \left\lfloor \frac{C}{D} \right\rfloor \text{ ve } S_B = \left\lfloor \frac{B}{D} \right\rfloor. \quad (5)$$

Bu durumda yukarıda tanımlanmış olan sistem iki boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri ile modellenmektedir. Şekil 1 de görüldüğü üzere, sistem durumları iki parametre ile gösterilmektedir. Bunlardan birincisi kullanımda olan şebeke gücü birim adettir ve bu sayı 0 ile S_G arasında değişmektedir. İkinci parametre ise, kullanımda olan enerji depolama birim adettir. Benzer şekilde bu parametrede 0 ile S_B arasında değer almaktadır. Sunulan modele bakıldığında ergodik olduğu kolaylıkla anlaşılmaktadır. Sistem durumları arasındaki geçiş oranları ise yukarıda belirtilmiş sistem tanımı ile hesaplanmıştır. Örnek vermek gerekirse sistem (1,1) durumunda iken üç vakıya olabilir: (1) sisteme yeni bir tüketici α geçiş hızı ile katılabilir, (2) bir tüketicinin talebi şebeke gücü β geçiş hızı ile sonlanabilir, (3) bir tüketicinin talebi şebeke gücü γ geçiş hızı ile sonlanabilir. Dikkat edilmesi gereken bir husus ise, sistem (S_G, S_B) durumunda iken bütün kaynaklar kullanım altında olduğundan yeni tüketici talepleri karşılanamayacak ve kesinti ya da engellenme olayı gerçekleşecektir. Şekil 1'de de sunulduğu üzere Markov zincirindeki toplam durum sayısı

$$T = (S_G + 1) \times (S_B + 1), \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Markov zincirinde bulunan 1'den T 'ye kadar olan kalıcı durumların olasılık dağılımlarının $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_T)$ vektörü ile gösterilmesi durumunda $\boldsymbol{\pi}$ vektörünün aşağıdaki denklemler ile hesaplanması mümkündür:

$$\boldsymbol{\pi} \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

ve

$$\sum_{i=1}^T \pi_i = 1. \quad (8)$$

(7) no'lu denklemde kullanılan \mathbf{Q} matrisi $T \times T$ boyutlarında olup sonsuz küçük üreteç matrisi olarak adlandırılır. Bu matrisin alakalı elemanları sistem durumlarının geçiş hızlarını belirtir. Bu matrisi hazırlamak için Şekil 1 de görünen Markov zincirindeki durumlar 1'den T ye kadar soldan sağa olacak şekilde numaralandırılır. Örneğin (0,0) durumu için 1, (0,1) durumu için ise S_B+1 numarası atanır. O halde \mathbf{Q} matrisinde kolun endeksi için i ve satır endeksi içinde j kullanılırsa, matrisin elemanları aşağıdaki eşitlikleri sağlayacaktır:

$$q_{ij} \geq 0, \quad i \neq j, \quad (9)$$

ve

$$q_{ii} = - \sum_{i \neq j} q_{ij}, \quad " i \quad (10)$$

İlk eşitliğe göre asal köşegen olmayan elemanlar sıfır geçiş hızı değerlerini alırken, ikinci denkleme göre ise asal köşegen elemanlar o satırdaki toplam geçiş oranının negatifi olarak yazılır. Sistem durumlarının

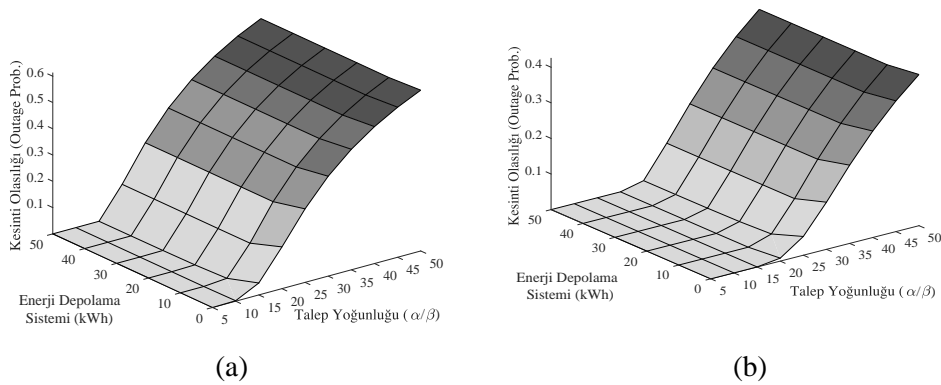
olasılık dağılımlarını hesaplayan (7) no'lu eşitlik T adet ve (8) no'lu eşitlik ise 1 adet denklemden oluşmaktadır. Sistem durumu olasılık vektörü π 'ın T adet bilinmeyi içerdiği göz önüne alındığında, sistem iki yöntem ile çözülebilir. Bunlardan ilki, bilinmeyenlerin başlangıç değerleri için bir tahminde bulunup iteratif olarak çözülmeye çalışmaktır. Bu yöntemde ilk tahmin önemli olup sonuca ulaşma garantisi edilmemektedir. İkinci yöntem ise, [23] referansında da detaylı olarak sunulduğu üzere Gauss elimine yöntemi ile yapmak mümkündür. Bu yöntem, sonuca ulaşma garantisi vermesinden dolayı, bu çalışmadaki hesaplamalarda tercih edilmiştir.

3. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK MODEL (PERFORMANCE EVALUATION AND ECONOMIC MODEL)

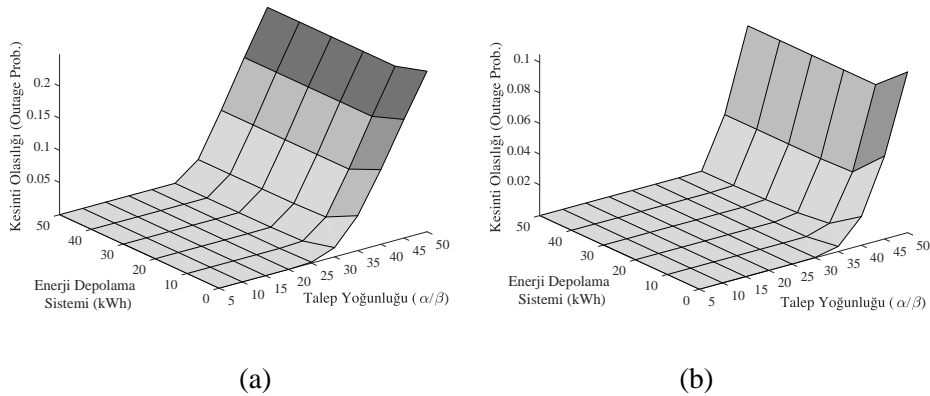
A. SİSTEM PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ (SYSTEM PERFORMANCE EVALUATION)

Bu bölümde dizayn edilen sistemin performansı sistem parametrelerine göre hesaplanmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi sistem yürütücüsünün ana amacı düşük bir kesinti ya da engelleme olasılığına karşın gerekli şebeke gücü ve enerji depolama sisteminin boyunu belirlemektir. Sistem parametrelerinden tüketici talep hızı α dış değişken olup sistem yöneticisi tarafından seçilememektedir. Bu parametre genelde yoğun zamanlarda artarken yoğun olmayan zamanlarda, örneğin gece yarısından sonra, düşüş göstermektedir. Tüketici talebinin ortalama aktif olma zamanı ise β ile gösterilir. Bu iki parametrenin oranı, $\frac{\alpha}{\beta}$ ise talep yoğunluğu (*load intensity*) olarak adlandırılır. Tüketici talebinin şebeke veya enerji depolama sisteminden karşılanması aktif olma istatistiğini değiştirmeyeceğinden γ ile β katsayıları eşit kabul edilmiş ve simülasyon boyunca 2 olarak kabul edilmiştir, yani ortalama aktif olma süresi birim zamanın yarısı kadardır. Bu katsayıların başka değerler almaları da mümkündür. Ayrıca birim müşteri talebi 1 kW olarak kabul edilmiştir

Performans değerlendirmelerini geniş bir skalada yapabilmek için, talep yoğunluğunu 0'dan 50'ye, enerji depolama sistemi kapasitesini 0'dan 50 kWh'e ve şebekeden çekilen gücü 20, 30, 40 ve 50 kW olarak değiştirerek çeşitli durumlar ele alınmıştır. Sistem performans hesaplamaları Şekiller 3 ve 4'te sunulmuştur. Sonuçlara bakıldığında ilk göze çarpan durumlardan biri şebekeden çekilen güç arttıkça sistemin daha iyi performans vermesi ve daha fazla oranda müşteri taleplerinin karşılanmasıdır. Diğer bir husus ise, enerji depolama sistemi müşteri taleplerini karşılamada etkin olsa da yüksek trafik rejimlerinde şebeke kullanım halinde olacağı için enerji sistemi şarj edilemeyecek olup kullanılmayacaktır. Bu yüzden sistem operatörünün yapması gereken şebekeden daha çok güç çekmek ya da müşteri taleplerini zamana yaymaktır.

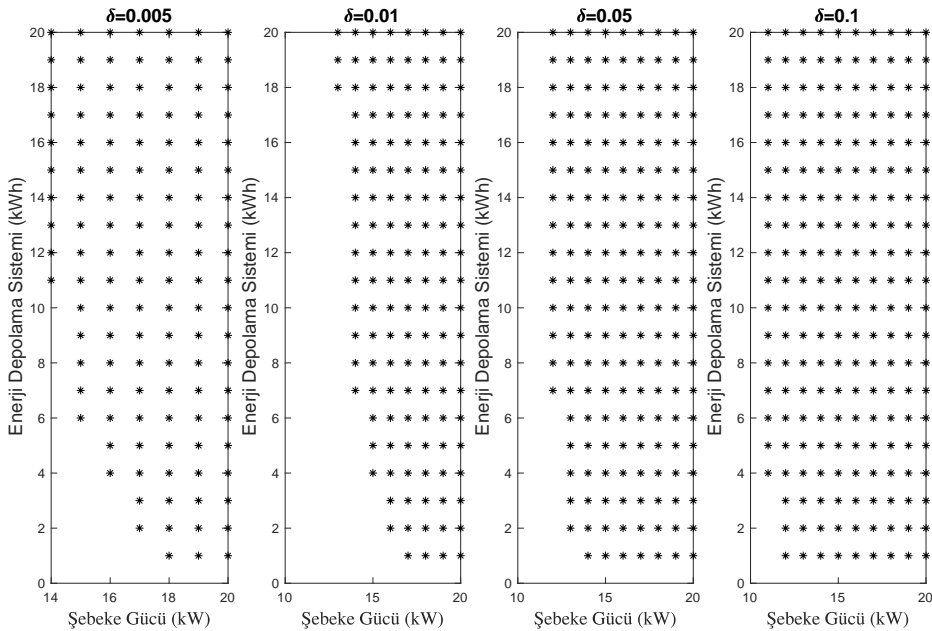


Şekil 3. Sistem performans değerlendirmesi: (a) $C=20$ kW; (b) $C=30$ kW



Şekil 4. Sistem performans değerlendirme: (a) $C=40$ kW; (b) $C=50$ kW

Buraya kadar sunulan sistem performans değerlendirmesine ek olarak (4) no'lu denklemde belirtilen problemi, yani hedef kesinti olasılığını aşmamak için gerekli olan sistem kaynakları hesaplanacaktır. Bu hesaplamayı yapabilmek için talep yoğunluğunu 10 olarak seçildi ve şebeke gücü ile depolama sistemi boyunu 0'dan 20'ye artırılarak dört farklı kesinti olasılığı ($\delta = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$) için hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 5 de görüldüğü üzere, daha sıkı sistem performansı için, örneğin müşteri taleplerinin %99,5'ini ($\delta = 0.005$) karşılayabilmek için şebeke gücü en az $C=14$ kW ve depolama sisteminin boyu en az $B=11$ kWh olmalıdır. Eğer enerji depolama sisteminin maliyeti yüksek ise veya şebekeden çekilecek güçte üst limit yok ise, $C=14$ kW ve $B=2$ kWh sistem kapasitesi de performans hedefini yakalamaya uygun olacaktır. Öte yandan, sistem operatörü müşteri taleplerinin sade %90'nını karşılamayı hedefliyor ise, sistem kaynaklarını $C=11$ kW ve $B=4$ kWh olarak seçmesi yeterli olacaktır.



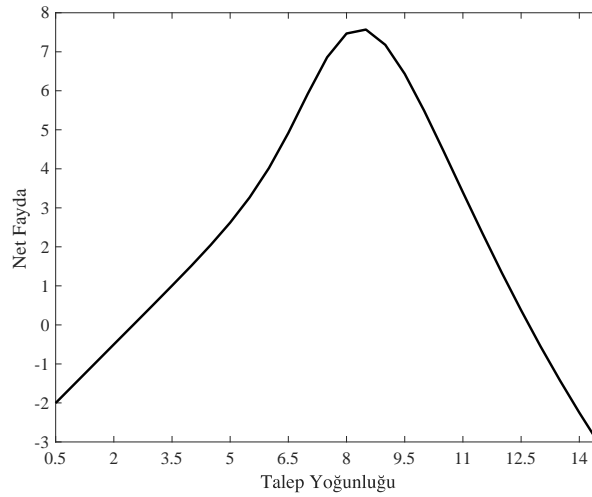
Şekil 5. Minimum kesinti olasılığını (δ) sağlayan değişik sistem kombinasyonları.

B. SİSTEM EKONOMİK FAYDA MODELİ (SYSTEM PROFIT MODEL)

Bu bölümde, önceki bölümde sunulan performans değerlendirmelerine ek olarak sistem ekonomik fayda modeli sunulmaktadır. Bu modelin amacı ekonomik parametreleri Stokastik model ile ilişkilendirip sistem operatörüne, kesinti olasılığının ötesinde, kapasite planlaması yapılmasını sağlamaktır. Ekonomik modelin parametreleri şöyle sıralanabilmektedir. Sistemden elektrik talep eden her müşteri eğer şebekeden güç çekmiş ise F_g kadar ücret öderken, ilgili sistem durumları $\rho^g = \{(i, j): 1 \leq i \leq S_G, 0 \leq j \leq S_B\}$ kümesi ile gösterilir. Buna paralel olarak, enerji depolama sisteminden güç talep eden tüketiciler F_b kadar ücret öderken, ilgili sistem durumları $\rho^b = \{(i, j): 0 \leq i \leq S_G, 1 \leq j \leq S_B\}$ kümesi ile ifade edilir. Kesinti olasılığını ise sistemin (S_G, S_B) durumunda olma olasılığı ile eşit olduğu için, engellenme durum kümesi $\rho^e = \{(i, j): i = S_G, j = S_B\}$ ile gösterilir. Sistem fiyatlama politikasının önemli bir enstrümanı ise müşteri talebinin karşılanamaması durumunda F_p kadar ödenen cezadır. Bu mekanizma ile sistem operatörünün uygun sistem kapasitesini seçmesi için ekonomik motivasyon sağlanmaktadır. Bu durumda sistem ekonomik modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Fayda = \sum_{s \in \rho^g} F_g n(s) \pi(s) + \sum_{s \in \rho^b} F_b n(s) \pi(s) - M_0 - BM_a - \sum_{s \in \rho^e} F_p n(s) \pi(s) \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemde M_0 enerji depolama sisteminin sabit satın alma maliyeti, M_a depolama sisteminin boyutu ile ilgili maliyet parametresidir ve lineer bir ilişki varsayılmıştır. $n(s)$ ise $\pi(s)$ durumunda bulunan aktif kullanıcı sayısıdır. Bu durumda $n(s)$ ile $\pi(s)$ çarpılması beklenen değeri (expected value) vermektedir



Şekil 6. Ekonomik modelin $C=10 \text{ kW}$ $B=10 \text{ kWh}$ için hesaplanması.

Sunulan ekonomik model $C = 10 \text{ kW}$, $B = 10 \text{ kWh}$ ve değişen yoğunluk talebi parametreleri ile hesaplanmıştır. Bu örnekte tüketici talebinin depolama sisteminden veya şebekeden karşılanmasının farklı olmayacağı varsayıp $F_p = F_g = 1$ olarak kabul edilmiştir. Tüketici talebinin engellenmesi ise iş modeli ve müşteri memnuniyeti açısından iyi karşılanmayan bir durum olduğu için engellenme cezası $F_e = 1.2$ olarak seçilmiştir. Buna ek olarak $M_a=0.001$ ve $M_0 = 2.5$ olarak kabul edilmiştir. Şekil 6'da sistemin net fayda hesaplamaları yapılmıştır. Sunulan modelde, talep yoğunluğu kontrol edilemeyen dışsal bir değişken olup, sistem operatörü talep yoğunluğuna göre uygun enerji depolama boyu ve şebekeden seçilen gücü belirlemektedir. Buna göre talebin düşük olduğu sistemlerde, örneğin talep yoğunluğunun 0.5 ila 2.5 aralığında olduğu yerlerde, seçilen enerji depolama sistemi maliyetinin yüksek olması nedeniyle sistem operatörüne negatif fayda sağlamaktadır. Bu tip durumlarda daha küçük depolama sistemi seçilmesi ekonomik açıdan tavsiye edilen bir durumdur. Diğer bir yandan, yüksek talep rejiminde, örneğin talep yoğunluğunun 12.5 ve üzerinde olduğu zamanlar, kesinti olasılığının yükselmesi ve müşterilere ödenen cezanın artmasından dolayı kar edilememektedir. Bu nedenle sistem operatörünün kapasiteyi arttırması gerekmektedir. Öte yandan trafik rejiminin 8-8.5 olduğu aralıkta karın maksimize edildiği görülmektedir ve kapasite seçiminin bu trafik rejimi için doğru olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, parametre seçim kriterlerinde bazı kısıtlamaların olması da mümkündür. Örneğin sistem dağıtım şebekesi elemanlarının çalışma limitlerinin aşılması durumunda, şebekeden çekilecek güçte kısıtlama olacağından daha büyük boyutta enerji depolama sistemi gereksinimi duyulabilir. Buna benzer olarak, satın alınabilecek depolama

sistemi için bütçe kısıtlaması olması durumunda şebekeden daha çok güç çekmek gerekmektedir. Bu ekonomik model ile sistem operatörünün finansal parametreleri de göz önüne alarak uygun kapasite planlaması yapması planlanmıştır

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Son yıllarda enerji depolama sistemlerine olan ilgi, düşen maliyetler ve elektrik şebekelerinde duyulan sistem esnekliği gereksinimi yüzünden hızla artmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin mesken tipi kullanıcılar tarafından bireysel olarak satın alınması için maliyetlerin daha da düşmesine ve kamu teşviki gibi ekonomik desteklemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, enerji depolama sistemlerinin bir grup kullanıcı tarafından müşterek kullanımı ekonomik olarak daha uygun olmaktadır. Bu makalede, bir grup tüketici tarafından ortaklaşa kullanılan enerji depolama sisteminin rassal modelleme yöntemi ile kapasite hesaplaması yöntemi sunulmuştur. Sistem modeline göre yoğun zamanlardaki müşteri talepleri şebeke ile enerji depolama ünitesinden çekilen güç ile karşılanmıştır. Tüketici talepleri literatüre uygun olarak Poisson süreci kullanılarak, sistem durumları ise iki boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşıma göre, müşteri talebi toplam arzı aşarsa, yeni gelen talepler engelleneceğinden, kesinti olasılığı, şebeke gücü, müşteri talep istatistikleri ve enerji depolama boyutuna göre hesaplanmıştır. Böylelikle sistem operatörü hedef kesinti olasılığına karşın uygun kapasite planlaması yapılmasına olanak sağlanmıştır. Sunulan çeşitli hesaplamalı örnekler ile sistem parametrelerinin birbirleri ile ilişkileri ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, ekonomik parametreler göz önüne alınarak sunulan ekonomik fayda modeli ile talep yoğunluğuna göre kapasite belirleme kriterleri belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Anonim değerlendirmede bulunan hakem ve editörlere yorumlarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Farhangi, H. The path of the smart grid. IEEE Power and Energy Magazine, 8, 1, (18-28), (2010), ([10.1109/MPE.2009.934876](https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876))
- [2] Amin, M. The Case for Smart Grid. PUBLIC UTILITIES FORTNIGHTLY, 5, (25-32) (2015).
- [3] Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G. ve Demirtas, K. Smart grid technologies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66, (499-516), (2016), (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.002>)
- [4] Bayindir R., Demisbas S., Irmak, E., Cetinkaya, U., Ova, A., ve Yesil, M. Effects of renewable energy sources on the power system. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, (388-393), (2016), ([10.1109/EPEPEMC.2016.7752029](https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2016.7752029)).
- [5] Cappers, P., Goldman, C., ve Kathan, D. Demand response in US electricity markets: Empirical evidence. Energy, 35:4, (1526-1535), (2010), (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.029>)
- [6] Doğan, H. ve Yılkıran, N. Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli Ve Projeksiyonu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 3:1, (375-384), (2014).
- [7] Kabalcı, Y. ve Kabalcı, E. Akıllı Şebekeler için Kablosuz Enerji İzleme Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 5:2, (2017).
- [8] Bayram, I.S., ve Ustun, T. A survey on behind the meter energy management systems in smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, (1208-1232), (2017), (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.034>)
- [9] Bayram, I.S., ve Tاجر, A. (2017) Plug-in electric vehicle grid integration, London: Artech House, 100,150.
- [10] Arnold, G. W. Challenges and opportunities in smart grid: A position article. Proceedings of the IEEE, 99:6, (922-927), (2011).

- [11] U.S. GRID ENERGY STORAGE FACTSHEET, Center for Sustainable Systems, University of Michigan, 2018. [Online]. Available: <http://css.umich.edu/factsheets/us-grid-energy-storage-factsheet>.
- [12] Kim, I. ve Kim, D. Optimal capacity of shared energy storage and photovoltaic system for cooperative residential customers. *IEEE Information and Communications*, (293-297), (2017), ([10.1109/INFOCOM.2017.8001682](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8001682))
- [13] Arghandeh, R., Woyak, J., Onen, A., Jung, J., ve Broadwater, R. Economic optimal operation of Community Energy Storage systems in competitive energy markets. *Applied Energy*, 135, (71-80), (2014), (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.066>)
- [14] Parra, D., Norman, S., Walker, G., ve Gilliot, M. Optimum community energy storage system for demand load shifting. *Applied Energy*, 174, (130-143), (2016), (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.082>)
- [15] Stelt, S., AlSkaif, T., ve Van Sark, W. Techno-economic analysis of household and community energy storage for residential prosumers with smart appliances. *Applied Energy*, 209, (266-276), (2018), (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.096>)
- [16] Song, J., Krishnamurthy, V., Kwasinski, A., and Sharma R. Development of a Markov-chain-based energy storage model for power supply availability assessment of photovoltaic generation plants. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 2, (491-500), (2013), ([10.1109/TSTE.2012.2207135](https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2207135))
- [17] Dong, J., Gao, F., Guan, X., Zhai Q., ve Wu, J. Storage-Reserve Sizing With Qualified Reliability for Connected High Renewable Penetration Micro-Grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7:2, (732-743), (2016), ([10.1109/TSTE.2015.2498599](https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2498599))
- [18] Kong, C., Bayram, I. S., ve Devetsikiotis, M. Revenue Optimization Frameworks for Multi-Class PEV Charging Stations. *IEEE Access*, 3, (2140-2150), (2015), ([10.1109/ACCESS.2015.2498105](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2498105))
- [19] Vardakas, J. S., Nizar Z., and Verikoukis, C. V. Scheduling policies for two-state smart-home appliances in dynamic electricity pricing environments. *Energy*, 69, (455-469), (2014), (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.037>)
- [20] Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., ve Clifford, C. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, *Energy and Buildings*, 42:10, (878-1887), (2010), (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.023>)
- [21] Ardakanian, O., Keshav, S., ve Rosenberg, C. Markovian models for home electricity consumption. *ACM SIGCOMM workshop on Green networking*, (31-36), (2011), ([10.1145/2018536.2018544](https://doi.org/10.1145/2018536.2018544))
- [22] Ahn, K., Dadlani, A., Kim, K. and Saad, W., Revenue maximization of multi-class charging stations with opportunistic charger sharing. *IEEE International Conference on Communications*, (2018), ([10.1109/ICC.2018.8422910](https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422910))
- [23] Stewart, W. (1994) *Introduction to the numerical solution of Markov chains*, Princeton University Press, ([10.1109/TPWRS.2016.2553678](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2553678))
- [24] Qiu, T., Bolun X., Yishen W., Yury D., Kirschen, D. Stochastic multistage coplanning of transmission expansion and energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32, 1, (643-651), (2017), ([10.1109/TPWRS.2016.2553678](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2553678))
- [25] Khan, F.A., Pal, N. ve Saeed, S.H. Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, (937-947), (2018), (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.107>)



Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Parçaların 3B Yazıcılar ile Doğrudan Üretilmesi

Ulaş YAMAN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya/ANKARA

Öz

Bu çalışma çerçevesinde geliştirilen yöntem ile birlikte tasarım ve üretim akışına verilen mekanik parçaların topoloji optimizasyonu yapılmakta ve eklemeli imalat yöntemlerinden Eriyik Yığılma Modellemeyi kullanan 3 boyutlu yazıcılarda doğrudan üretilebilmeleri için makine komutları üretilmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte topoloji optimizasyonu yöntemlerinin uygulanabilirliği ortaya çıkmıştır. Çalışmada kullanılan Eriyik Yığılma Modelleme yöntemi karışık geometriye sahip parçaların üretimi için ilk akla gelen yöntemlerden olmasa da destek malzemesi konusundaki gelişmelerle birlikte daha da sıklıkla kullanılacağı öngörülmektedir. Geliştirilen yöntemde öncelikli olarak verilen parçanın tanımlanan koşullara göre topoloji optimizasyonu yapılmakta ve sonrasında parçanın iç yapısı kabuklardan oluşacak şekilde üretim komutları oluşturulmaktadır. Bu işlemler Rhino3D bilgisayar destekli yazılımı ile birlikte çalışan ve algoritma geliştirme ortamı olan Grasshopper3D ile otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Yöntemin geçerliliğini ortaya koymak için farklı yaklaşımlarla üretilmiş olan yalın dayanıklı kirişler yük altında test edilmiştir. Sonuçlara göre önerilen yöntem ile üretilen kirişin ağırlık-mukavemet başarımı diğerlerine göre oldukça iyidir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 02/12/2018

Düzeltilme: 28/01/2019

Kabul: 06/02/2019

Anahtar Kelimeler

Eklemeli imalat

Topoloji optimizasyonu

FDM

Doğrudan dilimleme

Keywords

Additive manufacturing

Topology optimization

FDM

Direct slicing

Fabrication of Topologically Optimized Parts via Direct 3D Printing

Abstract

Within the scope of this study, machine codes are generated to fabricate topologically optimized parts directly, conveyed to the design and fabrication pipeline, utilizing 3 dimensional printers employing Fused Deposition Modeling type of additive manufacturing method. As the additive manufacturing industry advanced, topology optimization methods became applicable on the parts. Although Fused Deposition Modeling, which is used in this study, is not one of the popular methods for fabricating complicated parts, it will be utilized more frequently in the near future with the help of the advancements in support materials. In the proposed methods, the parts are first topologically optimized according to the defined conditions and then the machine codes are generated to have the interior of them constructed with shell like structures. These steps are done in an automated manner on Rhino3D (computer aided design software) and its algorithmic design tool Grasshopper3D. In order to prove the advantage of the proposed method, simply supported beams are manufactured via different approaches and tested under load. According to the results of the tests, the proposed approach has much better weight-strength performance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

3 Boyutlu (3B) yazıcılar ile üretim ya da eklemeli imalat temel olarak nesnelerin katmanlar halinde üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Geleneksel boşaltmalı imalat yöntemlerinde karşılaşılan birçok sorun nispeten yeni olan eklemeli imalat yaklaşımlarıyla giderilmiştir. Karışık geometrilere sahip nesnelere, kafes yapılar, çoklu malzemeye sahip nesnelere, vb. eklemeli imalat ile rahatlıkla üretilebilmektedir [1]. Tasarım aşamasına getirmiş olduğu bu özgürlüklerden dolayı eklemeli imalat yöntemleri tasarım mühendisleri arasında oldukça ilgi görmektedir. Özellikle topoloji optimizasyonu eklemeli imalat yöntemlerinin yaygınlaşmasıyla (karmaşık geometrilerin üretilebilirliklerinin artmasıyla) daha da önemli duruma

gelmiştir [2]. Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin bu kadar önemli olmasının en temel nedeni parçaların mekanik özelliklerinde kötüleşmeye neden olmadan onları hafifletebilmeleridir. Günümüzde özellikle savunma ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışma çerçevesinde geliştirilen yöntemde girdi olarak verilen parçaların yüklerine ve bağlantı noktalarına göre topoloji optimizasyonu yapılmaktadır. Sonrasında elde edilen yeni geometrinin eklemeli imalat yöntemlerinden olan Eriyik Yığma Modelleme (EYM) ile üretilebilmesi için üretim dosyası (G-kodları) üretilmektedir. Geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak EYM sistemlerinin kafa yörüngesi dış profilin kabuklarından oluşmaktadır. Bu yeni yaklaşımla birlikte parçaların başarımları arttırılmaktadır.

Makalenin kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Takip eden bölümde çalışma ile yakından ilgili bilimsel yayınlarda örnekler verilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Üçüncü bölümde önerilen yöntemin ayrıntıları açıklanmıştır ve sonrasında yöntem ile üretilen parçaların test sonuçları dördüncü bölümde paylaşılmıştır. Son bölümde sonuçlar tartışılmış ve ileride yapılması planlanan çalışmalar belirtilmiştir.

2. İLGİLİ LİTERATÜR (RELATED LITERATURE)

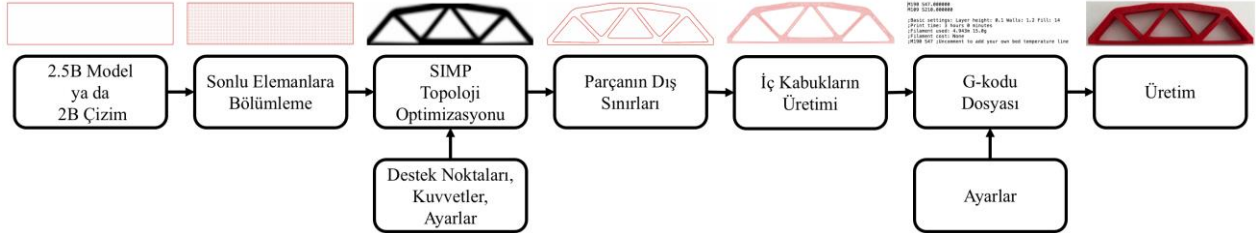
Günümüzde farklı eklemeli imalat yöntemleri, getirmiş oldukları üstün özelliklerden dolayı, topoloji optimizasyonu yapılmış parçaların üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanı toz yatağı tabanlı yaklaşımlardır. Bu sistemlerin tercih edilmelerinin ana nedenleri farklı malzemeler (plastik, metal, seramik, vb.) işleyebilmeleri ve özel destek yapılarına ihtiyaç duymamalarıdır. EYM [3] ise son yıllarda, patent süresinin sona ermesi, makinelerin ucuzlaması ve farklı konfigürasyonlarının oluşmasıyla birlikte topoloji optimizasyonu yoğunlukla çalışılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalarda daha çok parçaların iç yapılarının [4] ve destek yapılarının [5] optimizasyonlarına ağırlık verilmiştir. Mukavemeti yüksek malzemelerin (ABS Plus, PC ve Onyx) ve özel destek yapısı malzemelerinin (PVA) geliştirilmesi ile birlikte ilerleyen yıllarda EYM yönteminin topoloji optimizasyonu yapılmış parçaların üretiminde daha fazla kullanılması beklenmektedir.

İlgili literatürde eklemeli imalat ile uygulanan farklı topoloji optimizasyonu yöntemleri bulunmaktadır [6]. Cezalı Katı Eş Yönlü Malzeme (*Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP*) [7] yöntemi günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde daha önceden sonlu elemanlara ayrılmış olan parçanın elemanlar bazında ne kadar yoğunluğa sahip olması gerektiği literatürde sıklıkla kullanılan Sonlu Elemanlar Analizi (*Finite Element Analysis, FEA*) [8] sonucunda belirlenmektedir. Ceza katsayısının 1'den büyük olmasıyla birlikte düşük yoğunluğa sahip olan elemanlar birkaç yineleme sonrasında 0 yoğunluğuna sahip olmaktadır. Yinelemeler tamamlandığında parça içerisinde sadece 0 ve 1 yoğunluğuna sahip sonlu elemanlar kalmaktadır. 1 ile ifade edilen elemanlar optimize edilen parçayı temsil etmektedir. Literatürde öne çıkan diğer bir yöntem ise kiriş tabanlı yapılar için özellikle geliştirilen Zemin Yapıları Yöntemidir [9]. Yüksek kiriş yoğunluğuna sahip bir yapı yöntemin uygulanmasıyla birlikte sadeleşmekte ve aynı zamanda istenen başarımları göstermektedir. Bahsedilen iki yöntemden tamamen farklı olan diğer yöntemlerde evrimsel algoritmalar kullanılarak parçaların topolojileri gereksinimlere göre iyileştirilmektedir. Bu yöntemler hem kirişli [10] hem de katı yapılara [11] uygulanabilmektedir. Literatürde çeşitli sürümleri bulunan topoloji optimizasyonu yöntemleriyle birlikte parçaların farklı mekanik özellikleri geleneksel üretim yöntemleri uygulandığında ortaya çıkan parçalara göre arttırılmaktadır.

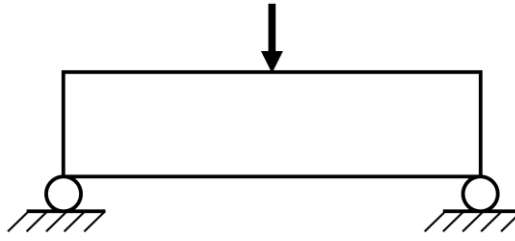
3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Çalışma kapsamında topoloji optimizasyonu yapılmış parçaların üretimi için önerilen yöntemin akışı baştan sona kadar Şekil 1'de verilmiştir. Parçaların optimizasyonu yapıldıktan sonra iç yapılarını özel olarak üretmek dayanımlarını arttırmayı amaçlayan yöntem, şimdilik 2.5 boyutlu (2.5B) diye tabir edilen 2 boyutlu (2B) çizimlere derinlik kazandırılmasıyla elde edilen parçalara uygulanabilmektedir. İlerleyen çalışmalarda yaklaşımın daha karmaşık yapılara sahip 3 boyutlu (3B) nesnelere üzerinde de uygulanabilmesi sağlanacaktır. Böylelikle kullanım alanının yaygınlaştırılması mümkün olacaktır.

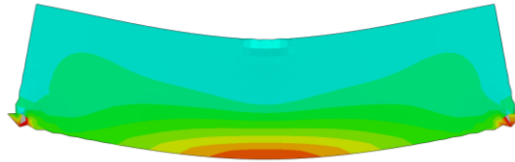
Şekil 1’de gösterilen tasarım ve üretim akışı Şekil 2’de sunulan örnek parça üzerinde uygulanmıştır. Kuvvet ve geometrik ölçülerin önemi olmadığı için şekil üzerinde gösterilmemiştir. Bu parçaya topoloji optimizasyonu yapılmadan üst orta noktadan kuvvet uygulandığı durumda yapılan sonlu elemanlar analizinin sonucu (gerilim dağılımı) Şekil 3’te gösterilmiştir. Sonuçtan anlaşılacağı üzere parçanın büyük bir bölümü fazla yükü maruz kalmamaktadır. Topoloji optimizasyonunun yapılmasıyla birlikte daha az malzeme ile aynı yükün taşınması mümkün olacaktır.



Şekil 1. Önerilen tasarım ve üretim akışı.



Şekil 2. Test parçası.

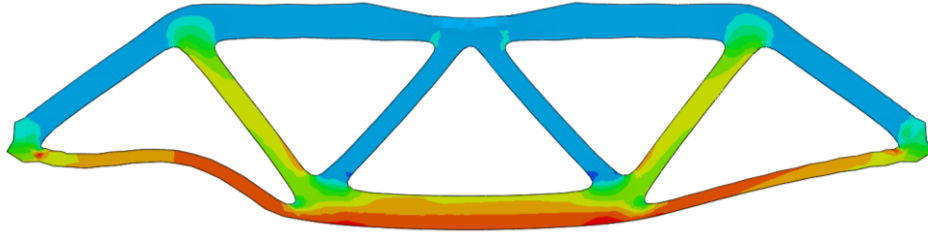


Şekil 3. Test parçasının sonlu elemanlar analiz sonucu.

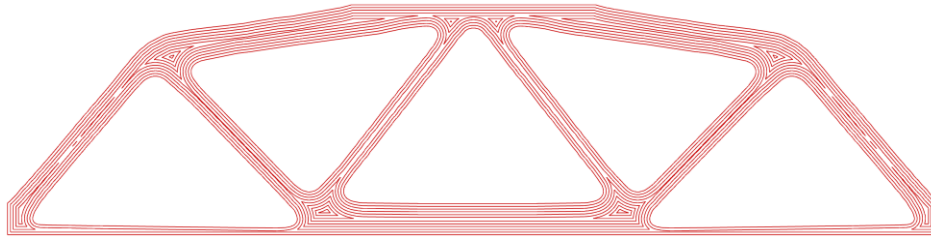
Önerilen tasarım ve üretim akışı, 2.5B modelin ya da 2B çizimin akışa girdi olarak verilmesiyle birlikte başlar. İlk gerçekleştirilen işlem modelin önceden belirlenen boyutta sonlu elemanlara bölünmesidir. Optimizasyonun daha hassas gerçekleştirilmesi isteniyorsa sonlu elemanların boyutlarının oldukça düşük olması gerekmektedir. Örnek uygulamadaki dikdörtgen parçanın boyutları $120 \times 30 \times 10 \text{ mm}^3$ iken sonlu eleman sayısı 3600'dür ($120 \times 30 \text{ mm}^2$) ve sonlu elemanların boyutu $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 'dir. Hassasiyetin değil de hesaplama zamanının önemli olduğu durumlarda sonlu elemanların boyutları artırılarak hesaplama süresi düşürülebilir. Böyle bir durumda ortaya çıkan parçanın üretilebilirliğini arttırmak için dış kabukta düzeltmeler yapılması gerekebilir. Parçanın bölünmesinden sonra Şekil 2’de tanımlanan destek yapıları, uygulanan kuvvet ve diğer gerekli ayarlar akışa girilir. Yapılan bu düzenleme sonrasında SIMP topoloji optimizasyon yaklaşımı parçaya uygulanarak optimize edilmiş parçanın dış sınırları belirlenir. Optimize edilmiş parçanın sonlu elemanlar analizinin sonucu (gerilim dağılımı) Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 3’teki sonuç ile karşılaştırıldığında ciddi oranda malzemenin azaldığı gözlemlenmektedir. Topoloji optimizasyonu için seçilen yöntemin ayrıntıları takip eden alt bölümde açıklanmıştır. Parçanın dış sınırları elde edildikten sonra çalışmanın en önemli katkılarından olan kabuklu iç yapılar üretilir. Detaylı görünümü Şekil 5’te verilen bu iç yapılar ile birlikte topoloji optimizasyonu yapılmış parçaların mukavemetinin artırılması

amaçlanmıştır. Kabuk yapılar oluşturulurken Angus Johnson'ın [10] geliştirmiş olduğu Çokgen Öteleme Algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın diğer benzer algoritmalara göre temel avantajı, adalı çokgenlerde başarıyla ötelenmiş yeni çokgenler oluşturabilmesidir. Dış sınırların ve iç kabuk yapılarının oluşturulmasının ardından üretimin yapılabilmesi için gerekli olan G-kodu dosyası, kullanılacak olan 3B yazıcıya özel olarak geliştirilmiş bir modül yardımıyla üretilir. Python programlama dili kullanılarak geliştirilen bu modül ile ilgili ayrıntılı bilgiler takip eden alt bölümlerde verilmiştir. G-kodu dosyasının üretilmesiyle birlikte üretim için dosya 3B yazıcıya aktarılıp parça üretilir. Kullanılacak olan 3B yazıcıya ve katman kalınlığına göre gerekli ayarların G-kodu dosyası üretimi öncesinde yapılması gerekmektedir.

Takep eden alt bölümlerde yöntemin önemli noktaları üzerinde durulmuştur.



Şekil 4. Topoloji optimizasyonu yapılmış test parçasının sonlu elemanlar analiz sonucu.



Şekil 5. Kabuklu iç yapılar.

3.1 SIMP topoloji optimizasyonu

Yöntem içerisinde kullanılan SIMP topoloji optimizasyonu yaklaşımı, yoğunluk tabanlı optimizasyon çözümleri arasında yer almaktadır. Literatürde çok farklı optimizasyon yöntemi bulunmaktadır. SIMP'nin özellikle seçilmesinin nedeni yöntemin Grasshopper3D ortamında gerçekleştirilmesi ve bu platform için sağlanan SIMP kaynakların güvenilir olmasıdır.

SIMP topoloji optimizasyon yönteminde temel amaç Denklem 3.1'de gösterildiği gibi sonlu elemanlara bölünen parçanın (n adet) elemanlarının yoğunluklarını (ρ) bulmaktır. Bunu gerçekleştirirken elemanların yer değiştirme miktarlarını (\mathbf{u}) kullanmaktadır.

$$\boldsymbol{\rho} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)^T, \mathbf{u} \quad 3.1$$

Sonlu elemanların yoğunlukları parçanın genel uyumunu (C) azaltacak şekilde düzenlenmektedir (Denklem 3.2 ve 3.3).

$$C = \mathbf{u}^T \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} \quad 3.2$$

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad 3.3$$

Bu denklemlerde \mathbf{K} evrensel sertlik matrisi olup \mathbf{f} ise parçaya uygulanan dış kuvvetleri temsil etmektedir. Evrensel sertlik matrisi ayrıntılı olarak Denklem 3.4 ile ifade edilmektedir.

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \rho_i^p \mathbf{K}_0 \quad 3.4$$

Denklem 3.4'te K_0 yoğunluğu 1 olan sonlu elemanın sertlik matrisini ifade etmektedir. p üssü ise cezalandırma katsayısını belirtmektedir. Bu katsayı 1 olduğunda optimizasyon sonucunda ortaya çıkan sonlu elemanlar ara yoğunluk (0-1) değerlerine sahip olabilmektedir. Çalışmada olduğu gibi 1'den büyük olarak seçildiğinde optimizasyon sonrasında sadece 0 ve 1 yoğunluk değerlerine sahip sonlu elemanlar bulunmaktadır. 0 yoğunluğuna sahip elemanlar silinerek optimize edilmiş geometri elde edilmektedir.

3.2 Yöntemin gerçekleştirilmesi

Önerilen yöntem Rhino3D (bilgisayar destekli tasarım yazılımı) için özel olarak geliştirilmiş algoritmik modelleme yazılımı olan Grasshopper3D aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımda farklı geometriler üzerinde işlemler yapılabilmesi için bloklar bulunmaktadır. Bloklara gerekli girdiler sağlandıktan sonra işlem blok tarafından gerçekleştirilmekte ve sonuçları takip eden bloklara aktarılmaktadır. Algoritma geliştirmenin nispeten kolay olduğu bu yazılım ortamında kullanıcının ihtiyacı olan blokların bulunmaması durumunda kullanıcı tarafından farklı dillerde (C, C++, C# ve Python) bloklar geliştirilebilmektedir. Çalışmada önerilen yöntem için geliştirilen Grasshopper3D akışı Şekil 6'da sunulmuştur.



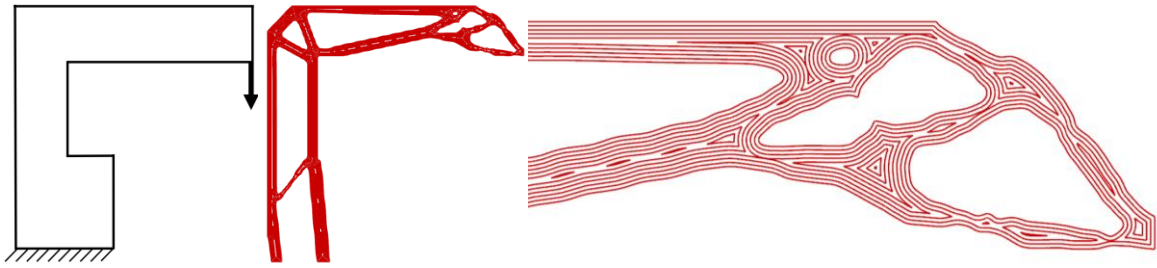
Şekil 6. Yöntemin Grasshopper3D uygulaması.

En sol tarafta bulunan bloklar yardımıyla SIMP yöntemi için gerekli girdiler (sonlu elemanlara bölümeleme, uygulanan kuvvetler, destek noktaları ve diğer ayarlar) hazırlanmaktadır [13]. Sonrasında SIMP yöntemi

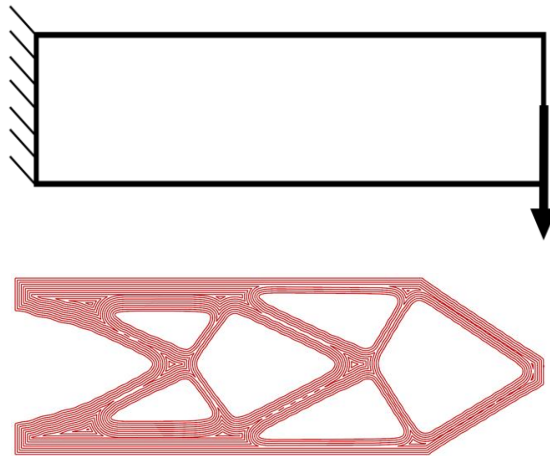
koşuturulmakta ve optimizasyon sonuçları elde edilmektedir. Yeni geometrinin dış sınırları elde edildikten sonra iç kabukların üretilmesine geçilmektedir. Kabuk üretiminde Grasshopper3D'nin sunduğu bloklar yetersiz olduğu için Python dilinde yazılarak iki yeni blok geliştirilmiştir. Bu bloklar yardımıyla yeni geometrinin içini dolduracak sayıda kabuk üretilmiş ve G-kodu dosyası çıkarılabilecek formata getirilmiştir. Son blok olan G-kodu üretimine girdi olarak dış profil ve iç kabukların bilgileri verilmektedir. Bu bilgiler ve kullanılan 3B yazıcıya özel değişkenler kullanılarak ilgili G-kodlarını içeren dosya otomatik olarak üretilmektedir. Parçalar 2.5B olduğu için katmanların yörüngeleri arasında bir farklılık bulunmamaktadır. Sonrasında üretilen dosya 3B yazıcıya aktarılarak üretim gerçekleştirilmektedir.

3.3 Farklı örnek parçalar

Önerilen yöntemin esnekliğini ve işlevselliğini göstermek amacıyla yöntem farklı özelliklere sahip parçalar üzerinde de uygulanmıştır. Askıya benzeyen ilk parçanın optimizasyon öncesi ve sonrası Şekil 7'de gösterilmiştir. Oluşturulan yörüngeyi ayrıntısı da yine aynı şekilde verilmiştir. Görüldüğü üzere kabuk yapılar sorunsuz bir şekilde üretilmiştir. Diğer bir örnekte ise literatürde sıklıkla sınıyan ankastre kiriş (Şekil 8) kullanılmıştır. Bir önceki örnekte olduğu gibi kuvvet elemanın uç noktasından uygulanmıştır. Geliştirilen yöntem herhangi bir 2.5B parçanın optimizasyonu yapmakta ve kabuklu üretim için otomatik olarak üretim dosyasını oluşturmaktadır.



Şekil 7. Askı parçasının optimizasyonu

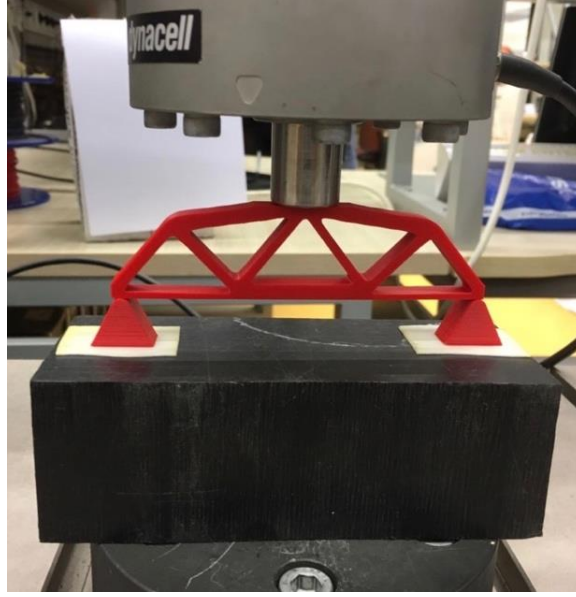


Şekil 8. Ankastre kirişin optimizasyonu

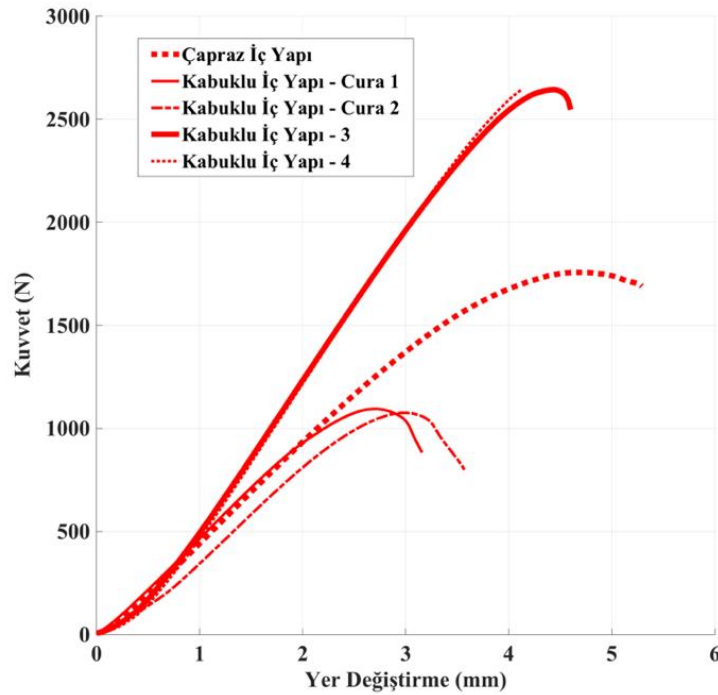
4. TESTLER (TESTS)

Önerilen yöntem kullanılarak üretilen basit dayanaklı kirişler ve karşılaştırma için Cura yazılımıyla üretilen kirişler Şekil 9'da gösterildiği gibi orta noktalarından yüklenerek test edilmişlerdir. Testler sırasından uygulanan kuvvet ve kafanın hareketi sürekli olarak kayıt edilmiştir. 5 farklı parça üzerinde yapılan testlerin

sonuçları Şekil 10’da yer alan Kuvvet-Yer Değişirme grafiğinde gösterilmiştir. *Çapraz İç Yapı* olarak tabir edilen parçanın G-kodu dosyası geleneksel akış içerisinde kullanılan Cura yazılımı ile üretilmiştir ve parçanın iç yapısı çapraz ağlardan oluşmaktadır. *Kabuklu İç Yapı – Cura 1-2* olarak isimlendirilen parçalar birebir aynı olup yine Cura yazılımıyla üretilmişlerdir. İlk parçadan farklılıkları çapraz iç yapılar yerine, yöntemde de kullanıldığı üzere, kabuk yapılaraya sahip olmalarıdır. Test edilen son iki parçanın (*Kabuklu İç Yapı – Cura 3-4*) G-kodu dosyaları geliştirilen Grasshopper3D akışıyla üretilmiş ve parçalar bu dosyalar kullanılarak 3B yazıcı ile üretilmiştir. Şekil 10’da sunulan sonuçlar incelendiğinde geliştirilen yöntem ile üretilen parçaların daha fazla yüke (~2600 N) dayanabildiği görülmektedir.



Şekil 9. Yükleme testi.



Şekil 10. Yükleme noktasındaki Kuvvet – Yer Değişirme grafikleri.

Parça kütlelerinin yük taşıma kapasitesine olan etkisini görmek için, Tablo 1’de sunulduğu üzere, parçaların taşıyabildikleri yük değerler kütlelerine bölünerek bir oran elde edilmiştir. Tablonun dördüncü kolonunda sunulan değerler incelendiğinde önerilen yöntemle üretimi gerçekleştirilen test parçalarının daha başarılı olduğu görülmektedir. Parçaların nihai üretim dosyalarının çıkarılması için geçen süreler de Tablonun son kolonuna eklenmiştir. Önerilen yöntem komutların üretilmesi için daha fazla süreye ihtiyaç duymaktadır. Bunun temel nedeni algoritma bir ticari yazılım içerisinde geliştirilmiştir ve doğrudan çalışmamaktadır. Yaklaşımın tamamı C++ ya da Python programlama dilleriyle geliştirilirse Cura yazılımından daha kısa sürede komut dosyalarını oluşturacaktır. Sürelerden çıkarılacak diğer bir nokta ise kabuk yörüngelerin oluşturulması için geçen sürenin çapraz yörüngelerin oluşturulması için gereken süreden daha fazla olduğudur. Kabuklar için özel algoritmalar kullanıldığından sürenin fazla olması beklenen bir durumdur.

Tablo 1. Üretilen Parçaların Ağırlıkları

Model	Kütle (g)	En Fazla Yük (N)	Oran (N/g)	Süre (s)
Çapraz İç Yapı	13,9493	1757	125,96	13,96
Kabuklu İç Yapı – Cura 1	13,3041	1095	82,31	16,35
Kabuklu İç Yapı – Cura 2	13,2598	1075	81,07	16,35
Kabuklu İç Yapı – 3	17,6232	2643	149,98	21,55
Kabuklu İç Yapı – 4	17,5927	2644	150,29	21,55

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada geliştirilen ve gerçekleştirilen yöntem ile girdi olarak verilen mekanik parçaların topolojileri optimize edilmekte ve FDM yöntemi ile üretilmeleri durumunda optimize edilmiş parçanın iç yapısı kabuklardan oluşacak şekilde nozul kafasının hareket yörüngeleri otomatik olarak oluşturulmaktadır. Gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda önerilen tasarım ve üretim akışının geleneksel FDM üretim akışına göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Parçaların yük taşıma kapasiteleri yaklaşık iki katına çıkmıştır.

Takip eden çalışmalarda önerilen çalışmanın

- 3B parçalar için de uygulanabilmesi,
- Farklı eklemeli imalat işlemleri ile kullanılabilmesi
- Farklı özelliklere (daha kırılğan, daha sünek, vb.) sahip malzemeler üzerindeki başarımı

için araştırmalar yürütülecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, 2015.
- [2] B. Aktimur, E. Gökpınar, Katmanlı Üretimin Havacılıktaki Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 3 (2014) 463-469.
- [3] R. Rezaie, Topology optimization for fused deposition modeling process, Procedia CIRP 6 (2013) 521-526.
- [4] N. Gardan, A. Schneider, Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing, Journal of Manufacturing Systems 37 (2015) 417-425.

- [5] M. Langelaar, Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 12 (2016) 60-70.
- [6] Z. Tomás, G.H. Paulino, Bridging topology optimization and additive manufacturing, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 53.1 (2016) 175-192.
- [7] M.P. Bendsøe, O. Sigmund, Material interpolation schemes in topology optimization, *Archive of applied mechanics* 69.9-10 (1999) 635-654.
- [8] E. Esener, E. Sönmez, M. Fırat, Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 6 (2018) 79-89.
- [9] M.P. Bendsøe, A. Ben-Tal, J. Zowe, Optimization methods for truss geometry and topology design, *Structural optimization* 7.3 (1994) 141-159.
- [10] H. Kawamura, H. Ohmori, N. Kito. Truss topology optimization by a modified genetic algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 23.6 (2002) 467-473.
- [11] S.Y. Wang, K. Tai, Structural topology design optimization using genetic algorithms with a bit-array representation, *Computer methods in applied mechanics and engineering* 194.36-38 (2005) 3749-3770.
- [12] A. Johnson, Clipper-an open source freeware library for clipping and offsetting lines and polygons, <http://www.angusj.com/delphi/clipper.php>, 2018. Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2018.
- [13] TopOpt plugin for Rhino and Grasshopper, <http://www.topopt.mek.dtu.dk/Apps-and-software/TopOpt-plugin-for-Rhino-and-Grasshopper>, 2018. Erişim Tarihi: 25 Kasım 2018.