

Editör

Doç. Dr. Kemal BALIKÇI

gece
kitaplığı

**Elektrik-Elektronik
ve Haberleşme
Alanında
Uluslararası
Araştırmalar ve
Değerlendirmeler**

**Ekim
2025**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-388-774-2

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Gece Kitaplığı / Gece Kitaplığı

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 0312 384 80 40

web: www.gecekitapligi.com

e-mail: gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

ELEKTRİK-ELEKTRONİK
VE HABERLEŞME
ALANINDA
ULUSLARARASI
ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR

DOÇ. DR. KEMAL BALIKÇI

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

TRANSİSTÖRÜN OPTİMİZASYON SONUCU BELİRLİ PERFORMANS DÖRTLÜSÜ İÇİN PARETO SINIRLARININ BELİRLENMESİ

Ahmet Arif ULUSLU- 1

Bölüm 2

TERMAL GÖRÜNTÜLEME TABANLI YANGIN ERKEN TESPİT SİSTEMİ TASARIMI VE IOT ENTEGRASYONU

Ali YÜCE- 21

Bölüm 3

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ: HARMONİK, FREKANS VE GERİLİM DAVRANIŞLARININ OLAY BAZLI İNCELENMESİ

Kadir DOĞANŞAHİN - 37

Bölüm 4

ALTI SEVİYELİ HİSTEREZİS AKIM BANTI İLE DA MOTORU HIZ DENETİMİ

Mehmet KARAYEL, Tefik ATAMAN- 57



Bölüm 1

TRANSİSTÖRÜN OPTİMİZASYON SONUCU BELİRLİ PERFORMANS DÖRTLÜSÜ İÇİN PARETO SINIRLARININ BELİRLENMESİ

Doç. Dr. Ahmet Arif Uluslu¹

¹ Yazar: Doç. Dr. Ahmet Arif Uluslu İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa ORCID ID:
0000-0002-5580-1687 *Doktora Tezinden Üretilmiştir.

GENETİK OPTİMİZASYON

Bu stratejik optimizasyon yöntemi, milyarlarca kombinasyon arasında uygulanabilir çözümler bulmayı mümkün kılarken, kapsamlı optimizasyon kabul edilemeyecek kadar uzun bir zaman almamaktadır. Genetik optimizasyon her olası kombinasyonu denemez. Bunun yerine, biyolojik evrimin prensiplerini kullanan karmaşık algoritmalar kullanır. Rastgele olumlu sonuçlar için örnek girişler ve testler seçilir. En iyi girişler tutulur ve en kötü olanlar yeni rastgele girişlerle değiştirilir bu işlem en uygun olanın hayatta kalması olarak adlandırılır (Fieldsend et al., n.d.). Kuşak sayısını, popülasyon büyüklüğünü ve yakınsama türünü değiştirerek optimizasyon özelleştirilebilir.

Algoritmanın iyi bir şey bulduğu düşünülürse, bu tepe noktasının bir aykırı olup olmadığını belirlemek için yeni bulunan tepe etrafında test yapmaya başlanır. Bu sonuç aykırıysa, genetik optimizasyon o sonucu bırakır ve diğer alanlara geçer. Aslında, sahip olunan olasılığı yüksek kombinasyonlar, daha iyi genetik optimizasyon çalışmalarıdır. Genetik optimizasyon tamamladıktan sonra; kapsamlı optimizasyon ile (ileriye yürümek veya teknik göstergeler) bulunan girişler test edilebilir (Kalyanmoy Deb, 2001; Marcellin, 2010).

Genetik optimizasyon, halihazırda var olan bir sistemin ince ayarını tekrardan yapabilirken ayrıca bir önceki oluşumda gözden kaçan yeni fırsatlar bulmayı mümkün kılar. Örneğin grafiklere, her biri gerçekten binlerce parametresi olan birçok belirteç uygulanabilir. Ardından bu belirteçler manuel olarak kapatılıp açılarak bunların genetik optimizasyondaki hedefleri tahmin etmeye yardımcı olup olmadığını kontrol edilebilir. Bu bulgular, fazla göstergeleri filtrelemek veya gerekli olanları korumak için de kullanılabilir.

Genetik Algoritmalarda ana fikir, optimizasyon problemlerini çözmek için bu evrim gücünü kullanmaktır (Piltan et al., 2023). Genetik optimizasyonun nasıl çalıştığını tam olarak anlamak için, genetik algoritmalar hakkında bir önceki kısımda detaylı bilgi verilmiştir. Şimdi çok amaçlı optimizasyonu keşfedelim.

Çok Amaçlı Optimizasyon

Mevcut yöntemlerin çoğu sadece tek bir amaç işlevini optimize edebilir. Bununla birlikte gerçek dünya verilerinde, veri türleri yalnızca sayısal niteliklerle sınırlı değildir, ancak çoğu veri ikili ve sıralı verilerden oluşmaktadır (Belen et al., 2018). Bu da birden fazla amaç fonksiyonu gerektirir. Örneğin koşulsuz veriler için kümelenmelerde, kümelerin yoğunluğu ve ayrılmasını ayrı ayrı optimize edilebilir (Mahouti et al., 2023).

Sadece tek bir ölçü olarak birleştirmek gerekmez. Genetik algoritmalar, aynı anda iki veya daha fazla nesnel fonksiyonu optimize etme yeteneğini sağlayan kümeleme tekniklerinden biridir.

Adından da anlaşılacağı gibi, çok amaçlı bir optimizasyon probleminin optimize etmesi gereken birtakım hedefleri vardır. Tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon arasındaki çarpıcı farklardan biri, çok amaçlı optimizasyonda iki alanla ilgilenmesi gerektiğidir.

Karar değişken (arama) alanı

Amaç alanı

Karar değişken alanı aday çözümlerin alanıdır. Onun eksenleri aday çözümlerin öznitelikleri yani parametreleridir. Amaç alanı aday çözümlerin amaç fonksiyonları aracılığıyla yansıtıldığı alan ve eksenleri sorunun amaç fonksiyonudur. Amaç fonksiyonları aday çözümlerini karar değişken alanından değişken alanlara eşler. Aday çözümün amaçlanan uzaklıktaki pozisyonu, seçim için diğer aday çözümler ile rekabette ne kadar uygun olduğundan belirlenir.

Çok Amaçlı Optimizasyonun Kriterleri

Gerçek hayat problemleri çoklu amaçlardan oluşmaktadır. Daha önceki çalışmalarda bu problemlere çözüm bulma girişimleri ağırlıklı ortalama dikkate alınarak daha basit tekli objektif algoritmalar kullanılmıştır. Bu yaklaşımla, tüm hedeflere uygun bir gerekçelendirme mümkün olmamıştır ve bu nedenle bu yaklaşımların çoğunda sonuç, gerçek çözümlerin çok uzağında kalmıştır. Bir problemin tüm hedeflerine önem vermek için çok amaçlı yaklaşım benimsenmiştir. Bu yaklaşımda, tüm amaç fonksiyonlarını aynı anda yerine getiren tek bir mükemmel çözüm elde etmek imkânsızdır. Genel olarak Pareto-optimal çözümler olarak bilinen bir dizi çözüm elde edilir ve bu nedenle çeşitliliği sağlayan çözümler arasında uygun bir denge ilişkisine sahip olmak önemli bir konu haline gelmiştir (Belen et al., 2022). Dolayısıyla esas amaç, gerçek yaşamdaki tüm hedeflere doğru gerekçelendirme sağlanması, elde edilen çözümler arasında iyi bir denge ilişkisine sahip olmasıdır (Huseyinov et al., 2019).

Pareto Optimal Çözümler

Nesnel işlevlerin doğada çatıştığı çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, her bir amaç fonksiyonu, farklı bir bireysel optimal çözüme sahip olabilir. Bu nedenle, tüm amaç fonksiyonları yerine getirmek için, en uygun çözüm yerine bir dizi optimum çözüm gereklidir. Bunun sebebi hiçbir amaç fonksiyonunun diğerlerinden daha iyi olmadığı düşünülebilir. Bu çözümler baskın-olmayan çözümlerdir (Chun-Wei Seah et al., 2012).

P baskın-olmayan bir dizi çözüm olsun. Sonra,

Her iki P çözümü, birbirine göre baskın olmamalıdır

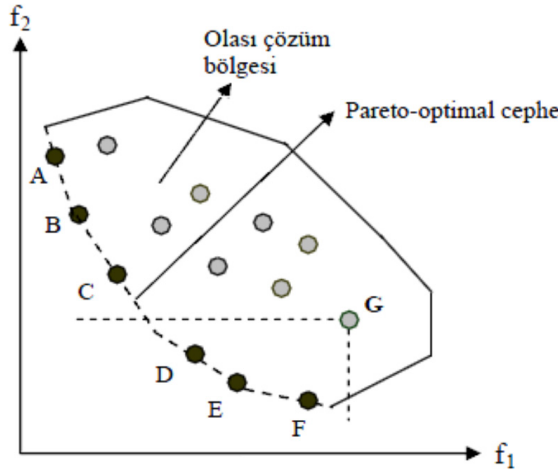
P 'ye ait olmayan herhangi bir çözüm, en az bir P üyesi tarafından domine edilebilir

Aslında, aşağıdaki koşulların her ikisi de doğruysa, x_1 çözümünün başka bir çözüm olan x_2 'ye baskın olduğu söylenir:

x_1 çözümü, tüm hedeflerde x_2 'den daha kötü değildir veya $f_j(x_1)$, tüm $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ için $f_j(x_2)$ 'den daha iyidir. Burada f_j , j^{th} nesnesinin işlevidir ve M hedeflerin sayısını ifade eder

x_1 çözümü, en az bir objektifte x_2 'den kesinlikle daha iyidir veya $f_j(x_1)$, en az bir $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ için $f_j(x_2)$ 'ten daha iyidir

Şekil 1'de gösterilen bir algoritmanın “zaman ve uzay karmaşıklığı” ile Pareto optimalligidir. Bu problemde hem zaman hem de uzay karmaşıklığı en aza indirilmelidir (Hui Li et al., 2009; Ngatchou et al., n.d.).



Şekil 1 Pareto optimal çözümler

Çok amaçlı optimizasyonda iki hedef vardır:

Pareto-optimal cephesine doğru ilerlenmesi

Baskın-olmayan cephede çeşitli çözümlerin sürdürülmesi

Çok amaçlı bir optimizasyon probleminde pareto-optimal sınırı, bu problemin ideal çözümleri olarak kabul edilir (Kalyanmoy Deb et al., 2014).

Bir genetik algoritma rastgele bir aday çözüm kümesiyle başlar. Bu aday çözüm kümesi büyük olasılıkla mümkün olan en iyi çözümler değildir ve genetik operatörler yardımıyla birkaç nesilden sonra mümkün olan en iyi çözüm setine doğru iteratif olarak ilerlenir. Pareto-optimal setine doğru ilerlerken, aynı zamanda son kullanıcıya alternatif denge ilişkilerinin sağlanması için çeşitli çözümlerin sürdürülmesi gerekmektedir. Elde edilen çözümler arasında çeşitliliği sağlamak için çeşitli yöntemler vardır (Kalyanmoy Deb, 2001).

Pareto Sınırları

Çok hedefli optimizasyon problemlerinde birbirleri ile çelişen birden çok hedef olmasından dolayı, optimizasyon problemin çözümünü sadece tekil bir çözüm noktası ile tanımlamak ve diğer çözüm noktalarından daha iyi olduğunu her zaman söylemek mümkün değildir. Bunun yerine, domine edilmemiş çözümler olarak isimlendirilen bir optimal çözüm kümesi bir hedefteki performansının diğer hedefin performansından fedakârlık yapmadan geliştirilemediği çözüm noktalarını içermektedir. Pareto optimal çözüm kümesi, farklı hedef fonksiyonları arasındaki ödünleşim yüzeyini ifade etmektedir ve bu kümeye pareto sınırı (Pareto Frontier) denir. Daha çok Pareto-optimal çözümlerin bulunması istenildiğinde, karar vericiye çeşitli sınırlar konularak seçilmiş çözümleri sunmak amacıyla Pareto sınırları üzerinde düzgün olarak dağılmışları bulmakta istenilir (K. Deb et al., 2002).

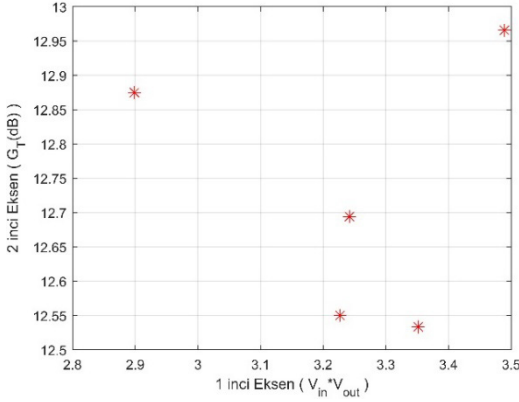
Bu kısımda çalışmada belirlenen Amaç Fonksiyonu için tasarlanan NSGA-III kodu kullanılarak (Gunes et al., 2020) çalışmasındaki beş farklı Performans Dörtlüsü ($F_{req} = F_{min}$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$), ($F_{req} = 1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$), ($F_{req} = 1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1$), ($F_{req} = 1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,1$), ($F_{req} = 1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$) için 10 iterasyon sonucunda çözüm uzayları üretilmiştir. Bütün çözümlerin performansları hedef uzayıyla eşleştirildikten sonra çıkan Pareto optimal çözüm kümesi sonuçları çözüm kümeleri arşivde depolanır. Bu çözüm uzaylarından belirlenmiş sınır içerisinde kalanlar için Pareto Sınırları çizdirilmiştir. Çözüm uzayı belirlenirken fiziksel gerçekleştirilebilirlik koşullarının yerine getirilmesi gereken durumları sağlayan çözümler seçilmiştir (Güneş et al., 2018).

$(F_{req} = F_{min}, V_{inopt}, G_{Tmak}, V_{outreq} = 1,2)$ Performans Dörtlüsü için Pareto Sınırlarının Belirlenmesi

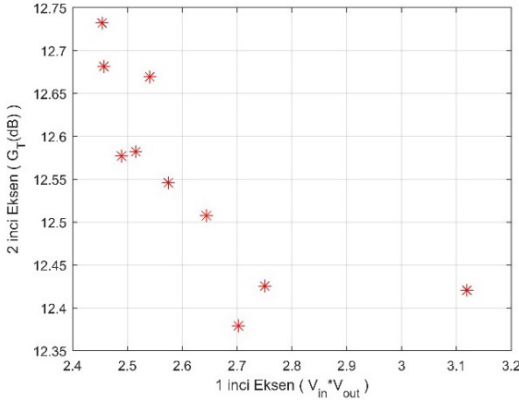
Transistör NE3511S02'nin Pareto Sınırları, 11 GHz - 16 GHz'de (2V, 10mA) 1 GHz aralıklı 6 örnek frekansında verilen Durum-1: ($F_{req} = F_{min}$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$) performans dörtlüsü için elde edilmiştir. Sonuçlar $G_T - V_{in}xV_{out}$ düzlemi üzerinde yer alan Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'de



gösterilmiştir. Bu sınırların her biri, 10×4050 Pareto Baskın çözümleri içerisinde $V_{in} < 3$ ve $V_{out} < V_{outreq} \times 1.03$ ve $F < F_{req} \times 1.03$ kriteri sağlayanlardan ve fiziksel gerçekleştirilebilirlik koşullarının yerine getirebilen sonuçlardan oluşur. Bir tasarım belirtimi olarak, dikey eksene en yakın nokta olan maksimum G_T 'ye sahip minimum $V_{in} \times V_{out}$ seçilebilir. Hedef minimum Gürültü Figürü (F_{min}) olduğundan ötürü bu Durumda çıkan Pareto Sınırı sayısı oldukça azdır. Daha fazla sonuç istenmesi durumunda seçilen F_{req} kriteri biraz daha büyütülebilir.

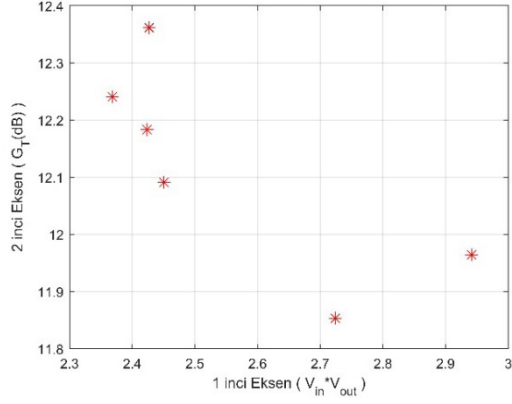


(A)

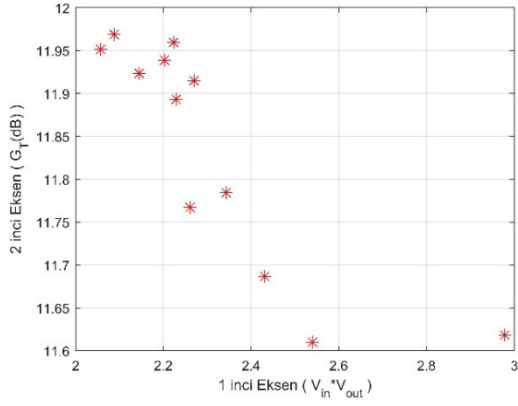


(B)

Şekil 2 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req} = F_{min}$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1, 2$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 11 GHz, (B) 12 GHz

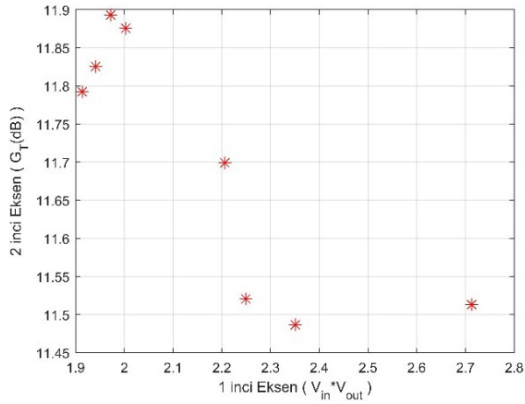


(A)

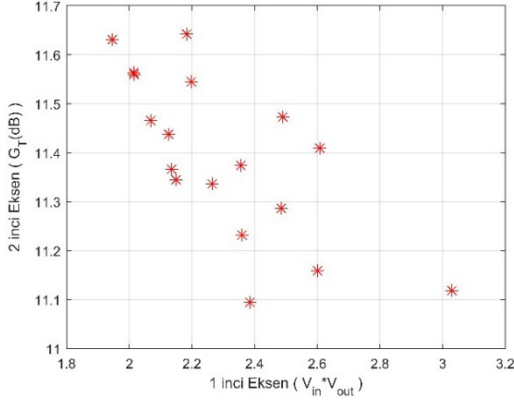


(B)

Şekil 3 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req} = F_{min}$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$) dördlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 13 GHz, (B) 14 GHz



(A)

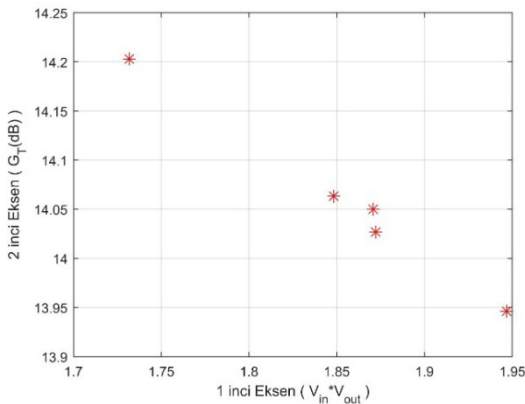


(B)

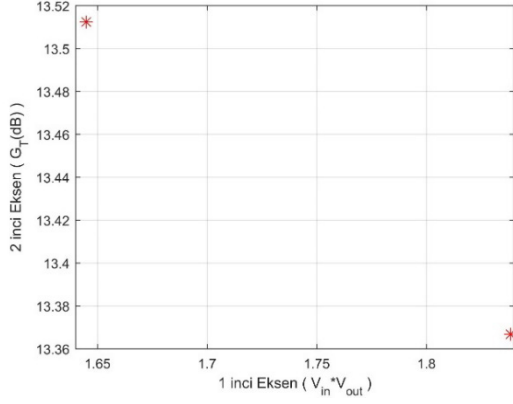
Şekil 4 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=F_{min}$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 15 GHz, (B) 16 GHz

($F_{req}=1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) Performans Dörtlüsü için Pareto Sınırlarının Belirlenmesi

Seçilen transistörün Pareto Sınırları, 11 GHz - 16 GHz'de (2V, 10mA) 1 GHz aralıklı 6 örnek frekansında verilen Durum-2: ($F_{req}=1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) performans dörtlüsü için elde edilir. Sonuçlar bir önceki ile aynı olarak $G_T - V_{in} \times V_{out}$ düzlemi üzerinde yer alan Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu sınırların her biri, 10x4050 Pareto Baskın çözümleri içerisinde $V_{in} < 1,6$ ve $V_{out} < V_{outreq} \times 1,03$ ve $F < F_{req} \times 1,03$ kriteri sağlayan sonuçlar içerisinde seçilir. Bazı durumlarda kazanç G_T 'nin çok yüksek olmasına karşın $V_{in} \times V_{out}$ değeri çok yüksek çıkmaktadır. Burada ihtiyaca binaen istenilen çözüm seçilerek devre gerçekleştirilebilir.

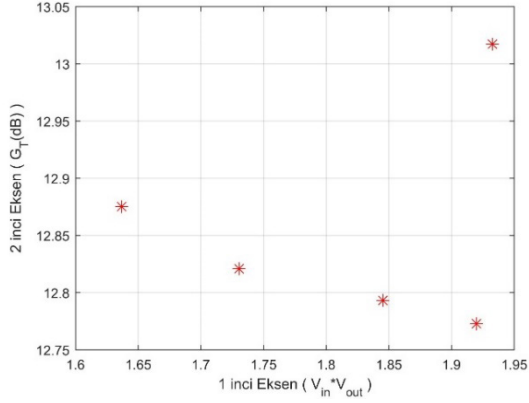


(A)

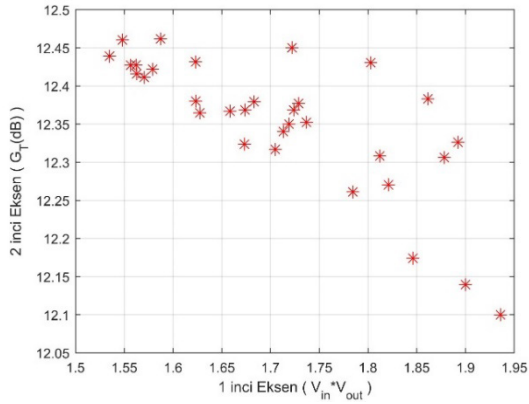


(B)

Şekil 5 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req} = 1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 11 GHz, (B) 12 GHz



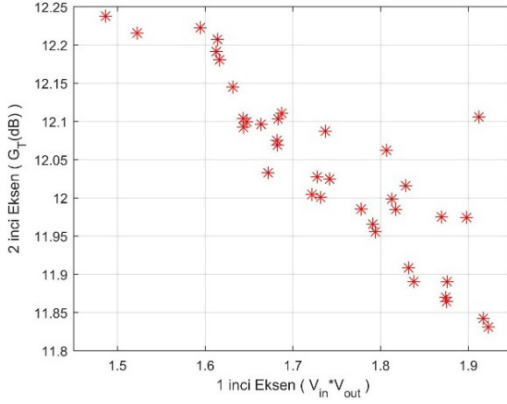
(A)



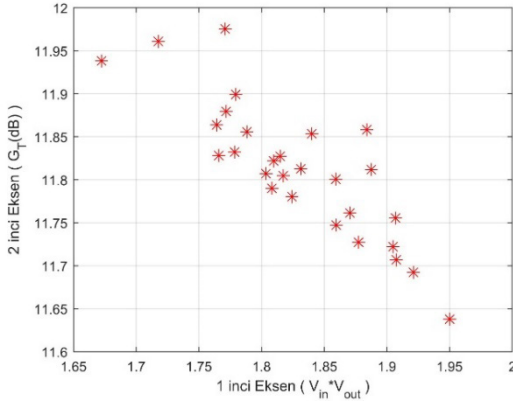
(B)



Şekil 6 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 13 GHz, (B) 14 GHz



(A)



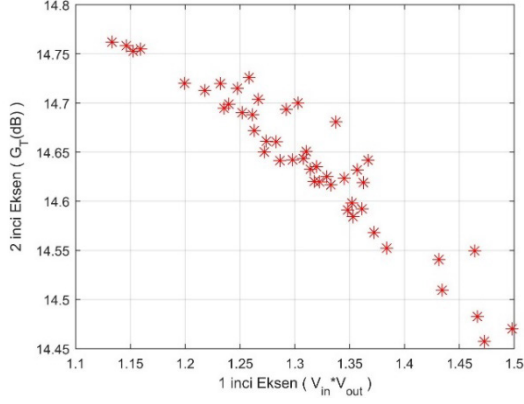
(B)

Şekil 7 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 15 GHz, (B) 16 GHz

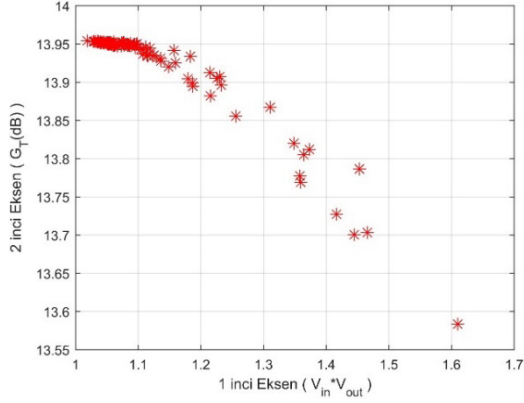
($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1$) Performans Dörtlüsü için Pareto Sınırlarının Belirlenmesi

Transistörün Pareto Sınırları, 11 GHz - 16 GHz'de (2V, 10mA) 1 GHz aralıklı 6 örnek frekansında verilen Durum-3: ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1$) performans dörtlüsü için elde edilir. Sonuçlar $G_T - V_{in} \times V_{out}$ düzlemi üzerinde yer alan Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da görülebilir. Bu sınırların her biri, 10x4050 Pareto Baskın çözümleri içerisinde Giriş $V_{in} < 1,6$ ve Çıkış $V_{out} < V_{outreq} \times 1.03$ ve Gürültü Figürü $F < F_{req} \times 1.03$ belirlenmiş olan seçim kriterini sağlayanlardan oluşur. Belirlenen Çıkış V_{outreq} olabilecek en iyi sonuç olduğundan dolayı belirlenen kriteri sağlayan Pareto Baskın çözümleri çok fazla olmamakla beraber Durum-1 e göre daha iyidir.

Daha fazla sonuç gözlenmesi için seçilen Çıkış V_{outreq} kriteri biraz daha büyütülebilir.

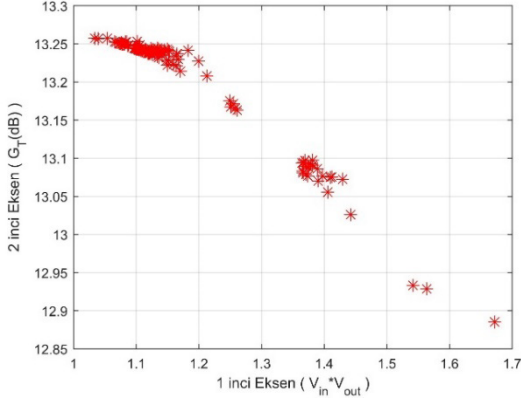


(A)

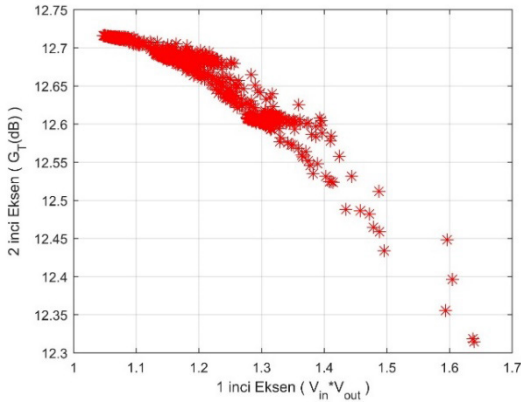


(B)

Şekil 8 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req} = 1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 11 GHz, (B) 12 GHz

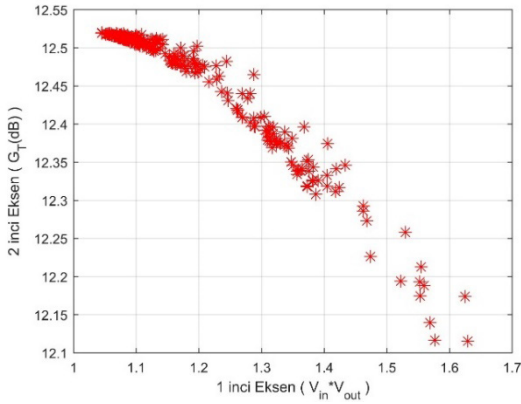


(A)

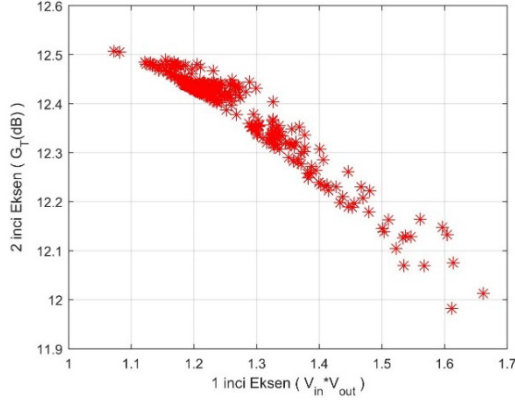


(B)

Şekil 9 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1$)
dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 13 GHz, (B) 14 GHz



(A)

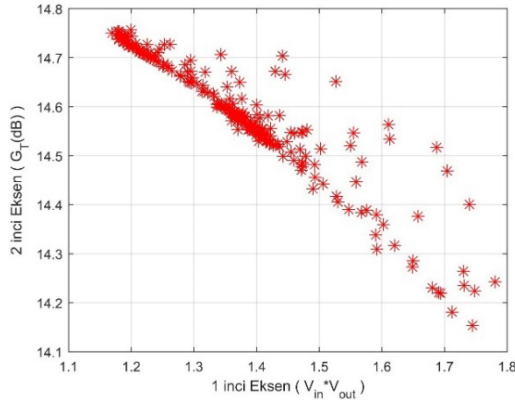


(B)

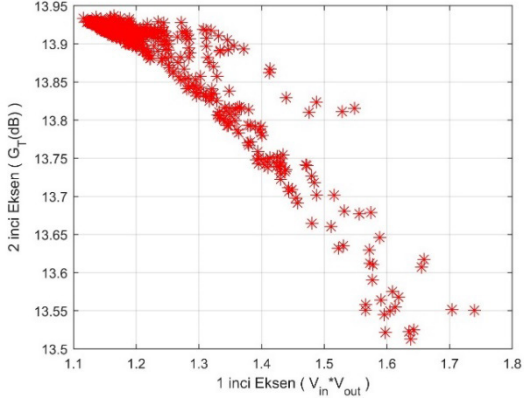
Şekil 10 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1$)
dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 15 GHz, (B) 16 GHz

($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,1$) Performans Dörtlüsü için Pareto Sınırlarının Belirlenmesi

Belirlenen Transistör için Pareto Sınırları, 11 GHz - 16 GHz'de (2V, 10mA) 1 GHz aralıklı 6 örnek frekansında verilen Durum-4: ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,1$) performans dörtlüsü için elde edilir. Sonuçlar $G_T - V_{in} \times V_{out}$ düzlemi üzerinde yer alan Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'de görülebilir. Bu sınırların her biri, 10x4050 Pareto Baskın çözümleri içerisinde $V_{in} < 3$ ve $V_{out} < V_{outreq} \times 1.03$ ve $F < F_{req} \times 1.03$ kriterini sağlayanlardan oluşur. Bulunan sonuçlar içerisinde Frekansın artışı ile birlikte belirlenen kriteri sağlayan Pareto Baskın çözümlerinin sayısı daha da arttığı gözlemlenmiştir.

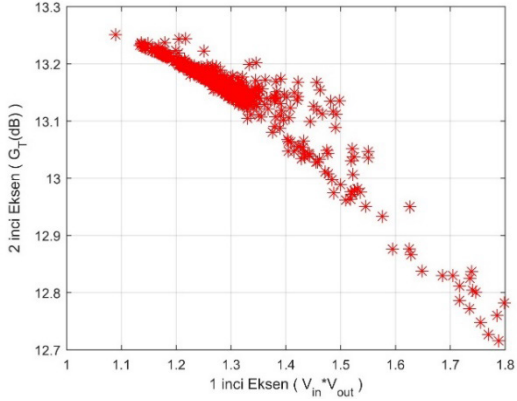


(A)

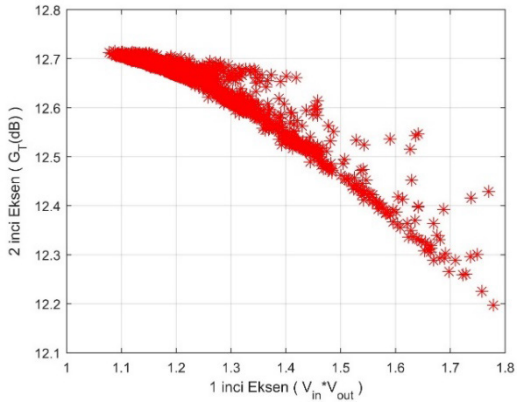


(B)

Şekil 11 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req} = 1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,1$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 11 GHz, (B) 12 GHz

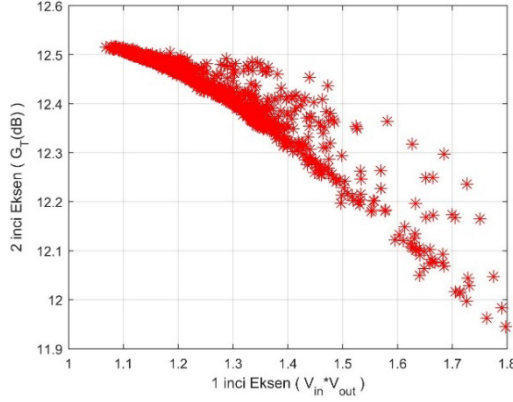


(A)

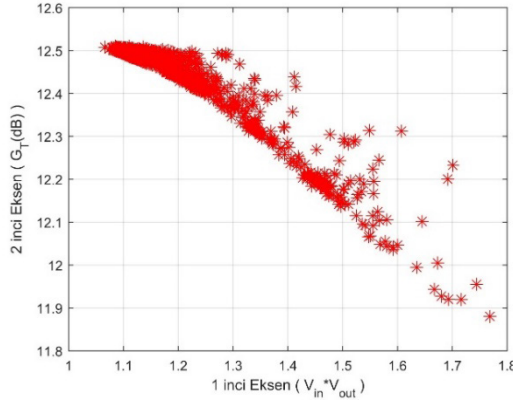


(B)

Şekil 12 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,1$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 13 GHz, (B) 14 GHz



(A)

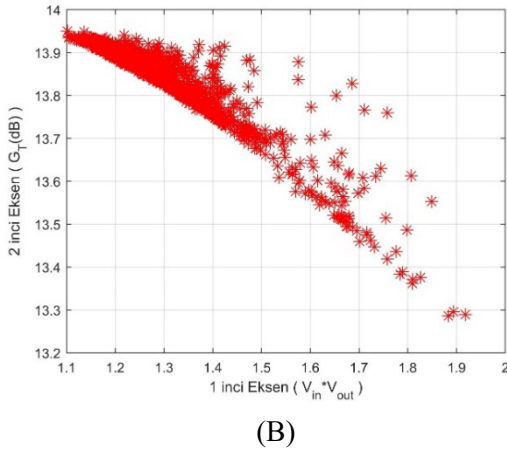
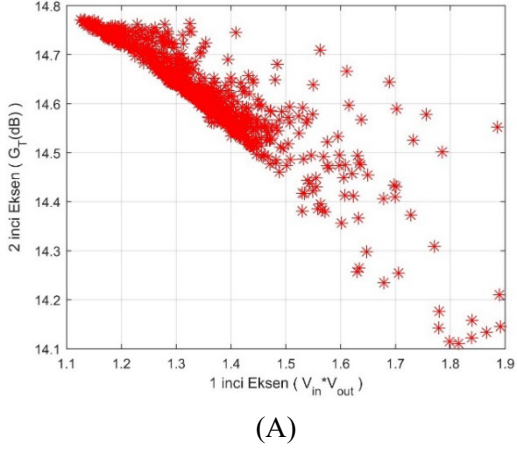


(B)

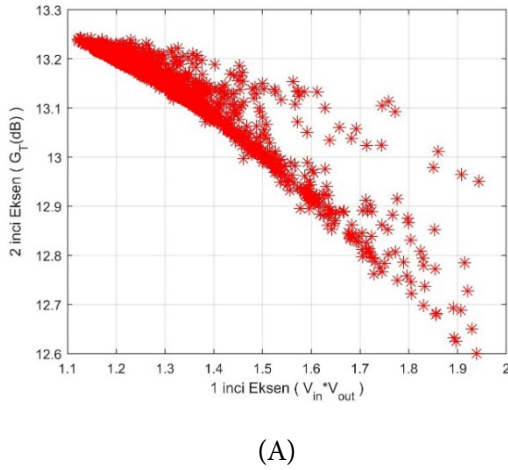
Şekil 13 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,1$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 15 GHz, (B) 16 GHz

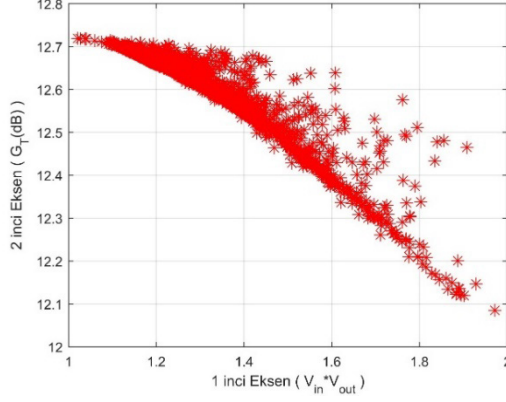
($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) Performans Dörtlüsü için Pareto Sınırlarının Belirlenmesi

Aynı transistör için Pareto Sınırları, 11 GHz - 16 GHz'de (2V, 10mA) 1 GHz aralıklı 6 örnek frekansında verilen Durum-5: ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) performans dörtlüsü için elde edilir. Sonuçlar $G_T - V_{in} \times V_{out}$ düzlemi üzerinde yer alan Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da görülebilir. Bu sınırların her biri, 10x4050 Pareto Baskın çözümleri içerisinde $V_{in} < 1,6$ ve $V_{out} < V_{outreq} \times 1.03$ ve $F < F_{req} \times 1.03$ koşulunu sağlayanlardan oluşur. Seçilen bu performans dörtlüsü için bol miktarda Pareto sınırları görünmektedir.



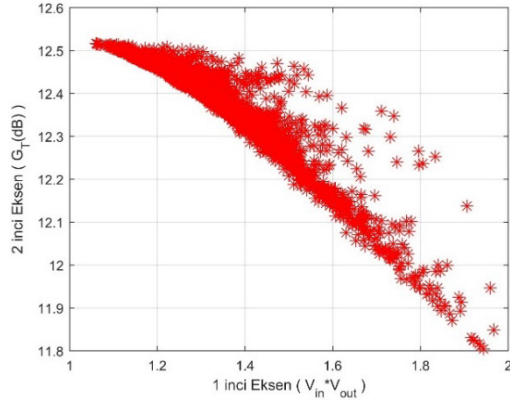
Şekil 14 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) dörtilülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 11 GHz, (B) 12 GHz



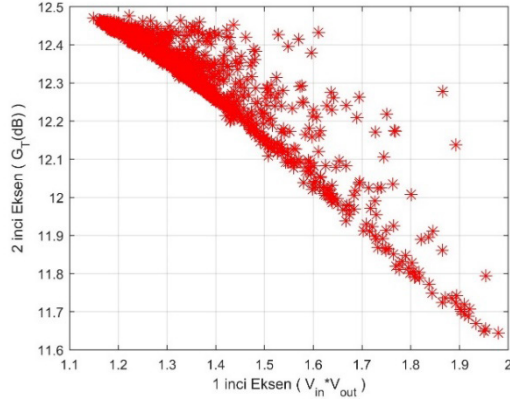


(B)

Şekil 15 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req}=1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq}=1,2$) dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 13 GHz, (B) 14 GHz



(A)



(B)

*Şekil 16 NE3511S02 Transistörü için ($F_{req} = 1,3$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$)
dörtlülerinin Pareto Sınırları gösterimi (A) 15 GHz, (B) 16 GHz*

Pareto sınırları belirlenen kriterler içerisinde mevcut olan bütün çözüm kümelerini seçilen eksenler üzerinde görülebilme olanağı garanti etmektedir. Ayrıca pareto sınırı tanımlanan amaç fonksiyonları için en uygun çözüm kümelerini sağlamaktadır. Bir sonraki bölümde yukarı kısımda çizdirilen Pareto sınırları, belirlenen Durum için Pareto Optimal Çözümü bulabilmek için kullanılacaktır.

KAYNAKÇA

- Belen, A., Gunes, F., Belen, M. A., & Moule, M. R. (2018). Design Optimization of Low-Pass Filter with Exponential Transmission Lines Using Differential Evolutionary Algorithm. *Journal of Intelligent Systems with Applications*, 93–97. doi: 10.54856/jiswa.201812030
- Belen, A., Tari, O., Mahouti, P., Belen, M. A., & Çalışkan, A. (2022). Surrogate-Based Design Optimization of Multi-Band Antenna. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*. doi: 10.13052/2022.ACES.J.370104
- Chun-Wei Seah, Ong, Y.-S., Tsang, I. W., & Siwei Jiang. (2012). Pareto Rank Learning in Multi-objective Evolutionary Algorithms. *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1–8. doi: 10.1109/CEC.2012.6252865
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. doi: 10.1109/4235.996017
- Deb, Kalyanmoy. (2001). *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Chichester: Wiley.
- Deb, Kalyanmoy, & Jain, H. (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), 577–601. doi: 10.1109/TEVC.2013.2281535
- Fieldsend, J. E., & Everson, R. M. (n.d.). Multi-objective optimisation in the presence of uncertainty. *2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 243–250. doi: 10.1109/CEC.2005.1554691
- Güneş, F., Belen, M. A., & Mahouti, P. (2018). Competitive evolutionary algorithms for building performance database of a microwave transistor. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 46(2), 244–258. doi: 10.1002/cta.2386
- Gunes, F., Uluslu, A., & Mahouti, P. (2020). Pareto Optimal Characterization of a Microwave Transistor. *IEEE Access*, 8, 47900–47913. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978415
- Hui Li, & Qingfu Zhang. (2009). Multiobjective Optimization Problems With Complicated Pareto Sets, MOEA/D and NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 284–302. doi: 10.1109/TEVC.2008.925798
- Huseyinov, I., & Bayrakdar, A. (2019). Performance Evaluation of NSGA-III and SPEA2 in Solving a Multi-Objective Single-Period Multi-

Item Inventory Problem. *2019 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, 531–535. doi: 10.1109/UBMK.2019.8907139

Mahouti, P., Kizilay, A., Razevig, V. V., Belen, M. A., & Piltan, O. C. (2023). Vivaldi Antenna Design With Frequency Selective Surfaces for GPR Applications. *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, 1–4. doi: 10.1109/RAST57548.2023.10197899

Marcelin, J.-L. (2010). Integrated Optimization of Mechanisms with Genetic Algorithms. *Engineering*, 02(06), 438–444. doi: 10.4236/eng.2010.26057

Ngatchou, P., Zarei, A., & El-Sharkawi, A. (n.d.). Pareto Multi Objective Optimization. *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*, 84–91. doi: 10.1109/ISAP.2005.1599245

Piltan, O. C., Kizilay, A., Belen, M. A., & Mahouti, P. (2023). Data driven surrogate modeling of horn antennas for optimal determination of radiation pattern and size using deep learning. *Microwave and Optical Technology Letters*. doi: 10.1002/mop.33702



Bölüm 2

TERMAL GÖRÜNTÜLEME TABANLI YANGIN ERKEN TESPİT SİSTEMİ TASARIMI VE IOT ENTEGRASYONU

Ali Yüce¹

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye. E-posta: ali.yuce@ozal.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4642-6272>

1. GİRİŞ

Yangınlar; ekosistem tahribatı, insan güvenliği ve ekonomik kayıplar açısından kritik bir tehdit oluşturmaktadır. İklim değişikliği, sıcaklık artışları ve kuraklık gibi faktörler, yangınların sıklığını ve şiddetini artırmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve EM-DAT (Uluslararası Afet Veri Merkezi) verileri, yalnızca 2023 yılı içerisinde yangınların 50 milyar doların üzerinde ekonomik zarara yol açtığını ve her yıl ortalama 180.000 hektar alanın yok olduğunu ortaya koymaktadır. Bu boyuttaki zararların önlenmesi için yangınların erken aşamada tespiti ve hızlı müdahalesi büyük önem taşımaktadır.

Mevcut yangın algılama sistemleri genellikle reaktif karaktere sahiptir; duman, sıcaklık veya alev sensörleriyle çalışan klasik yöntemler yangın başladıktan sonra tepki verir. Bu sistemler kapalı ortamlarda kabul edilebilir performans sergilerken, açık alanlarda (orman, fabrika sahası, rüzgârlı veya nemli bölgeler) performansları ciddi şekilde düşmektedir. Güneş ısı, hava akımı, toz partikülleri ve yüksek nem oranı gibi çevresel faktörler sahte alarm oranlarını yükseltebilmektedir. Bu nedenle, proaktif yani olaydan önce risk algılayabilen sistemlerin geliştirilmesi yönünde çalışmalar artmaktadır (Mohapatra, Bisoyi, & Dash, 2022).

Son yıllarda termal görüntüleme sensörleri (Infrared Thermal Imaging Sensors) üzerine yapılan araştırmalar, yangın erken tespiti alanında yeni bir paradigma oluşturmuştur. Termal kameralar, görünür ışık koşullarından bağımsız olarak yüzey sıcaklık dağılımlarını analiz edebilmekte; bu da duman oluşmadan önce sıcaklık anomalilerinin yakalanmasını mümkün kılmaktadır (Sousa, Moutinho, & Almeida, 2020).

Bu tür sistemlerin performansını ve erişilebilirliğini artırmak amacıyla Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı yangın izleme altyapıları son yıllarda ön plana çıkmıştır. IoT destekli sistemlerde sensör düğümleri yalnızca sıcaklık veya duman ölçümü yapmakla kalmayıp, aynı zamanda kablosuz iletişim protokolleri (örneğin Wi-Fi Mesh, LoRaWAN, NB-IoT) üzerinden verileri merkezi sunuculara ileterek gerçek zamanlı analiz ve erken uyarı olanakları sunmaktadır. Bu mimari, termal görüntüleme teknolojileriyle birleştirildiğinde, anlık sıcaklık anomalilerinin hem yerel hem de bulut tabanlı doğrulama süreçleriyle desteklenmesini sağlamaktadır. Böylece sistem yalnızca bir tespit aracı olmaktan çıkmakta; akıllı, bağlantılı ve ölçeklenebilir bir erken uyarı ekosistemi haline gelmektedir. Bu bağlamda, Park, Kim ve Kim (2023) tarafından geliştirilen bir çalışmada, IoT tabanlı yangın algılama sistemlerinden elde edilen sensör verileri bulanık mantık yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Çalışma, farklı yangın sinyal örüntülerinin tanınması ve yanlış alarm oranının azaltılması açısından

önemli bulgular sunmuş; özellikle IoT veri akışının yorumlanmasında bulanık çıkarım sistemlerinin etkinliğini ortaya koymuştur (Park, Kim, & Kim, 2023).

Li ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, termal kameraların robotik sistemlerle entegrasyonu sayesinde alev tespitinin yüksek doğrulukla gerçekleştirilebildiği ve önerilen YOLOv4-F modelinin geleneksel YOLOv4-tiny mimarisine kıyasla daha yüksek performans sunduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte, Khan ve arkadaşlarının (2022) kapsamlı derleme çalışmasında, klasik duman ve sıcaklık sensörlerinin açık alanlarda çevresel koşullardan (örneğin rüzgâr, nem, güneş yansıması) ciddi biçimde etkilendiği; buna karşılık, kızılötesi tabanlı termal görüntüleme sistemlerinin erken aşamada ısı anomalilerini daha güvenilir biçimde tespit ettiği belirtilmiştir. Benzer şekilde, Deng ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan incelemede, geniş hacimli endüstriyel ortamlarda kullanılan IR ve UV dedektörlerin performans karşılaştırması yapılmış ve termal sensörlerin çevresel parazitlere karşı daha yüksek kararlılık ve doğruluk sağladığı vurgulanmıştır (Khan et al., 2022; Deng et al., 2025).

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının gelişimiyle birlikte, termal görüntü tabanlı otomatik yangın tespiti alanında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, termal ve görünür tayf dron görüntülerinden yararlanarak orman yangını tespitinde son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Örneğin, Mukhiddinov ve arkadaşları (2022), iyileştirilmiş YOLOv5 modeliyle UAV görüntülerinde duman tespit performansını artırmış ve sahte alarm oranını önemli ölçüde azaltmıştır. Benzer şekilde, Han ve arkadaşları (2024), hafifletilmiş LUFFD-YOLO modelini geliştirerek termal dron görüntülerinde gerçek zamanlı yangın tespiti doğruluğunu artırmıştır (Mukhiddinov et al., 2022; Han et al., 2024). Ayrıca Termal ve/veya görünür tayf verilerinin derin öğrenme ile kullanıldığı çalışmalarda doğruluk anlamlı biçimde artmaktadır. Örneğin, Detectron2 tabanlı bir yaklaşım orman yangını tespitinde %99,3 kesinlik bildirmiştir; ayrıca RGB + termal (IR) hava görüntülerini birlikte kullanan bir çalışmada test kümesinde çok yüksek doğruluk değerleri rapor edilmiştir (Abdusalomov et al., 2023; Ghali et al., 2024).

Diğer taraftan, sistemin yalnızca tespitle sınırlı kalmayıp erken bildirim ve alarm doğrulama süreçlerini içermesi gerektiği de vurgulanmaktadır. *Automated Image-Based Fire Detection and Alarm System Using Edge Computing and Cloud-Based Platform* çalışmasında, termal kameralar ile edge bilişim birimlerinin birlikte kullanılması sayesinde veri gecikmesi azaltılmış ve bulut tabanlı uyarı sistemleriyle entegrasyon sağlanmıştır (Yang, Li, & Chen, 2024). *Smart fire alarm system with person detection*

and thermal camera adlı araştırmada, termal ve optik kameraların entegrasyonu sayesinde insan varlığı tespiti gerçekleştirilmiş ve bu yöntemle sahte alarm oranı %60 oranında azaltılmıştır (Ma et al., 2020).

Tüm bu literatür incelendiğinde, mevcut yaklaşımların büyük çoğunluğu yangının tespiti aşamasına odaklanmış olup, alarm doğrulama, olay güven skoru belirleme, ağ tabanlı bildirim altyapısı gibi üst katmanlarda sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda, bu çalışma; termal görüntüleme, gömülü sistem yazılımı ve akıllı bildirim altyapısını birleştiren bütünleşik bir yangın erken tespit sistemi mimarisi önermektedir. Sistem, sıcaklık anomalilerini çoklu kanıt modeli (sıcaklık eşiği, bölgesel alan büyümesi ve süreklilik) üzerinden değerlendirerek sahte alarm oranını düşürmekte, doğrulanan olaylarda GPS destekli otomatik uyarı üretmektedir. Modüller mimarisi sayesinde sistem farklı coğrafi koşullarda (ormanlık, endüstriyel veya kentsel alanlarda) ölçeklenebilir biçimde uygulanabilir. Böylece çalışma, sadece bir termal izleme prototipi değil; aynı zamanda akıllı, dağıtık ve veri odaklı bir afet yönetim altyapısının kavramsal temellerini sunmaktadır.

Bu çalışma, kavramsal düzeyde geliştirilen ve gelecekte donanım uygulamasıyla doğrulanması planlanan termal görüntüleme tabanlı bir yangın erken tespit sistemini önermektedir. Çalışma henüz prototip aşamasına geçmemiş olup, sistemin mimari kurgusu ve algoritmik çerçevesi üzerine odaklanılmıştır.

2. SİSTEM TASARIMI

Önerilen sistem, yangın başlangıç aşamasında sıcaklık anomalilerini tespit etmek, doğrulamak ve hızlı biçimde bildirmek amacıyla üç ana katmandan oluşmaktadır. Bunlar; Donanım Bileşenleri, Görüntü İşleme ve Alarm Doğrulama Modülü ve Haberleşme ve Bildirim Altyapısı şeklindedir. Bu çok katmanlı yapı, sahadaki termal sensörlerden elde edilen verilerin yerel olarak işlenmesini, olası anormalliklerin doğrulanmasını ve sonuçların merkezi kontrol birimine iletilmesini sağlamaktadır.

2.1 Donanım Bileşenleri

Sistem, termal sensör, mikrodenetleyici, kablosuz iletişim birimi, enerji yönetim sistemi ve konum belirleme modülünden oluşan modüller bir mimariyi esas almaktadır. Her bir bileşen, düşük güç tüketimi, çevresel dayanıklılık ve veri güvenilirliği kriterleri gözetilerek seçilmiş ve sistemin genel performansını maksimize edecek biçimde kurgulanmıştır. Donanım yapısının merkezinde yer alan termal görüntüleme sensörü, yüzey sıcaklıklarının yüksek doğrulukta ölçülmesini sağlayan birimdir. Tasarım aşamasında, 8–14 µm kızılötesi dalga boyu aralığında çalışan

FLIR Lepton 3.5 veya MLX90640 sensörlerinin kullanılması planlanmıştır. Bu sensörler, yaklaşık 0,1 °C sıcaklık çözünürlüğüyle çalışmakta olup, duman oluşmadan önce ısı artışlarını algılayabilecek hassasiyete sahiptir. Bu özellik, özellikle açık alanlarda erken evre yangınların tespiti açısından sistemin temel avantajını oluşturmaktadır. Veri toplama ve ön işleme süreçleri, çift çekirdekli işlemciye sahip ESP32 tabanlı bir mikrodenetleyici üzerinde yürütülmek üzere tasarlanmıştır. ESP32'nin gömülü Wi-Fi ve Bluetooth modülleri, sistemin kablosuz iletişim altyapısını desteklerken, aynı zamanda termal görüntü matrislerinden elde edilen sıcaklık verilerinin yerel olarak analiz edilmesine imkân tanımaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, her düğümün bağımsız bir ön analiz birimi olarak çalışmasını ve yalnızca anormal durumlarda veri aktarımı yapmasını mümkün kılmaktadır. Böylece ağ trafiği ve enerji tüketimi minimize edilmekte, sistemin ölçeklenebilirliği artırılmaktadır.

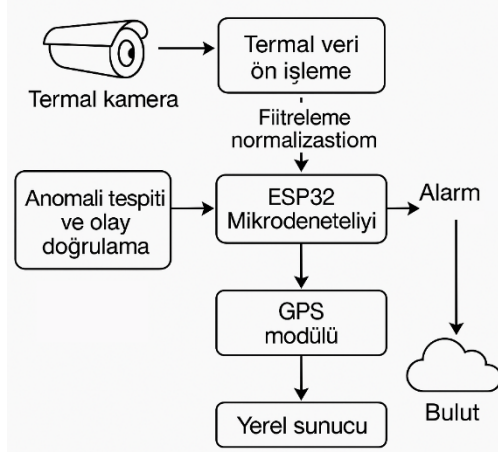
Kavramsal sistemde kablosuz iletişim altyapısı için birden fazla seçenek değerlendirilmiştir. Kentsel uygulamalarda Wi-Fi Mesh ağı, kısa menzilde yüksek veri aktarım hızı sağlarken; ormanlık veya kırsal bölgelerde LoRaWAN ve NB-IoT protokolleri uzun menzilli ve düşük enerji tüketimli bağlantı avantajı sunmaktadır. Bu esnek yapı sayesinde sistemin farklı coğrafi koşullarda çalışabilirliği artırılmış, aynı zamanda donanım gereksinimleri sadeleştirilmiştir.

Enerji altyapısı, sistemin sahada kesintisiz biçimde çalışabilmesi için güneş paneli ve Li-ion batarya kombinasyonu temelinde tasarlanmıştır. Güneş panelinden (yaklaşık 12 V / 5 W) elde edilen enerji, MPPT Maximum Power Point Tracking) destekli bir şarj devresi aracılığıyla 3.7 V / 3000 mAh kapasiteli bataryada depolanmaktadır. Bu çözüm, sistemin enerji açısından bağımsız bir şekilde 7/24 çalışabilmesini hedeflemektedir. Özellikle uzak ve altyapı erişimi kısıtlı bölgelerde bu yapı, operasyonel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Her düğümde yer alması planlanan GPS modülü, konum ve zaman damgası verilerini merkeze ileterek sistemin mekânsal doğrulama yeteneğini güçlendirecektir. Bu bilgiler, merkezi kontrol biriminde gerçekleştirilecek korelasyon analizlerinde kullanılacak, aynı anda birden fazla düğümün tespit ettiği olayların konumsal olarak doğrulanmasını sağlayacaktır. Ayrıca, sistem bileşenlerinin dış ortam koşullarına karşı korunması amacıyla IP65 sınıfı bir muhafaza tasarımı öngörülmüştür. Bu muhafaza, yüksek sıcaklık, yağmur, toz ve rüzgâr gibi zorlu koşullar altında bile sistemin güvenilir biçimde çalışmasına olanak tanıyacaktır.

Sonuç olarak, kavramsal olarak tanımlanan bu donanım mimarisi;

enerji bağımsız, modüler, kablosuz ağ destekli ve coğrafi olarak genişletilebilir bir yapıya sahiptir. Henüz fiziksel olarak üretilmemiş olsa da önerilen bu model, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek prototip üretimi ve saha testleri için teknik bir referans altyapısı sunmaktadır. Sistemin genel donanım kurgusu kavramsal olarak Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kavramsal donanım mimarisi.

2.2 Görüntü İşleme ve Alarm Doğrulama Modülü

Her düğüm tarafından elde edilen termal görüntü verileri ESP32 mikrodenetleyici üzerinde yerel olarak işlenir. Böylece sistem, yüksek veri iletim yükü oluşturmak yerine sadece anlamlı sonuçları merkeze gönderir. Veri işleme adımları sırasıyla aşağıdaki gibidir:

1. Gürültü Giderme: Median filtre ile sensör kaynaklı piksel gürültüsü azaltılır.
2. Normalizasyon: Görüntü sıcaklık aralığı [0–255] ölçeğine dönüştürülür.
3. Adaptif Eşikleme: Ortam sıcaklığına göre dinamik olarak belirlenen değere göre anormal bölgeler ayrıştırılır.
4. Alan ve Artış Analizi: Sıcak bölge alanı ve sıcaklık artış hızı hesaplanır.
5. Karar Katmanı: Elde edilen değerler eşiklerin üzerinde olduğunda olay “yangın adayı” olarak işaretlenir.

Her kare için oluşturulan sıcaklık matrisi sürekli olarak izlenmekte; sıcaklık artışı, bölgesel büyüme ve süreklilik koşulları aynı anda sağlandığında sistem “ön alarm” durumuna geçmektedir. Bu süreç, Şekil 2’de verilmiştir. Görüntü işleme modülünde kullanılan tipik parametre seti ise Tablo 1’de özetlenmiştir.



Şekil 2. Görüntü işleme ve alarm doğrulama akış diyagramı.

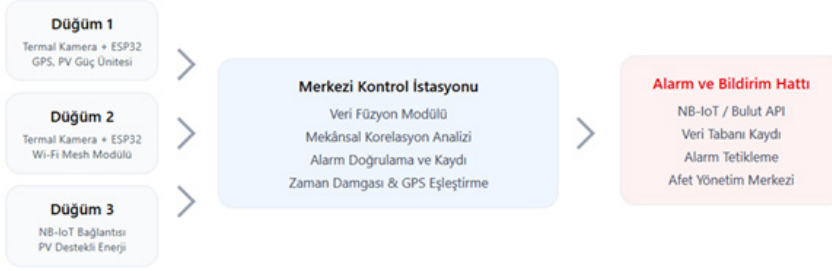
Tablo 1. Görüntü işleme modülüne ait örnek parametre seti.

Parametre	Sembol	Değer	Açıklama
Sıcaklık eşiği		120 °C	Kritik sıcaklık eşiği
Minimum alan		100 px ²	En küçük algılanabilir bölge
Artış oranı		8 °C/s	Anlık sıcaklık artış oranı
Süreklilik		3 kare	Arka arkaya eşik aşımı koşulu

2.3 Sistem Kurulumu ve Topoloji

Saha kurulumunda her termal kamera düğümü yaklaşık 100–150 m menzil içinde kalacak biçimde yerleştirilir. Düğümler arası iletişim, Wi-Fi Mesh veya NB-IoT teknolojileriyle gerçekleştirilir. Böylece kablolu gereksinimi ortadan kalkar ve sistem tamamen enerji bağımsız mini istasyonlar hâline gelir.

Merkezî kontrol birimi, gelen tüm termal veri akışlarını zaman damgası ve GPS koordinatlarıyla eşleştirir. Bu veriler arasındaki mekânsal tutarlılık, bölgesel doğrulama için kullanılır. Örneğin; bir bölgede art arda üç farklı düğümde sıcaklık artışı gözlemlenirse, sistem olayı “bölgesel yangın olasılığı” olarak değerlendirir. Bu yaklaşım, tek sensör kaynaklı hatalı tespitleri ortadan kaldırmaktadır. Sistemin topolojik yapısı Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. Sistem topolojisi: düğüm-ağ yapısı, kontrol istasyonu ve alarm iletişim hattı.

2.4 Veri Füzyonu ve Karar Mekanizması

Her düğüm belirli aralıklarla aşağıda verilen özet parametreleri merkezî kontrol birimine gönderir:

- Ortalama sıcaklık (),
- Maksimum sıcaklık (),
- Sıcak bölge alanı (),
- Sıcaklık artış hızı ().

Kontrol istasyonu, bu verileri birleştirerek kaynak füzyon algoritması uygular. Zamansal ve mekânsal korelasyon katsayısı hesaplanır.

Alarm kararı aşağıdaki mantıksal ifadeyle tanımlanır:

Burada , komşu düğümlerden gelen sıcaklık eğrileri arasındaki benzerliği ifade eden korelasyon katsayısıdır. Bu yöntem, literatürde Spatio-Temporal Fire Correlation (SFC) olarak tanımlanmakta ve çoklu sensör doğrulamasına dayalı modern yaklaşımlardan biridir. Kullanılan alarm tetikleme kriterleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Alarm tetikleme mekanizmasına ait karar kriterleri.

Parametre	Sembol	Eşik	Birim
Maksimum sıcaklık		120 °C	°C
Minimum alan		100 px ²	—
Korelasyon katsayısı		0.8	—
Güven eşiği		0.9	—

Eğer bu koşullar sağlanırsa sistem olayı doğrulanmış yangın olarak sınıflandırır ve alarm sinyali, çok katmanlı bildirim sistemi aracılığıyla ilgili birimlere iletilir.

3. UYGULAMA SENARYOSU VE POTANSİYELİ

Geliştirilen termal kamera tabanlı yangın erken tespit sistemi, farklı coğrafi ve yapısal ortamların gereksinimlerine uyarlanabilir modüler bir mimariye sahiptir. Sistem, donanım düğümleri (kamera modülleri), merkezi kontrol birimi ve bulut tabanlı izleme platformu arasında kurulan esnek ağ altyapısı sayesinde hem küçük ölçekli (tek tesis) hem de geniş ölçekli (şehir veya bölge düzeyinde) uygulamalarda kullanılabilir.

3.1 Şehir Ölçekli Uygulamalar

Sistem, belediye izleme merkezlerine entegre edilerek kentsel ölçekte bir yangın önleme ağı oluşturabilir. Kamera düğümleri, yüksek riskli bölgeler (otoparklar, atık depolama alanları, sanayi bölgeleri, trafo merkezleri, çatı ve güneş paneli sahaları) gibi stratejik noktalara yerleştirilebilir. Toplanan veriler, şehir afet yönetim merkezine bağlı bir Akıllı İzleme Platformu üzerinden analiz edilir.

Bu senaryoda her düğüm, bağımsız birer sensör istasyonu gibi davranırken, sistemin tamamı dağıtık bir erken uyarı ağı oluşturur. Veri merkezinde çalışan analiz yazılımı, farklı düğümlerden gelen sıcaklık anomalilerini mekânsal olarak eşleştirir ve şehir genelinde ısı haritası oluşturur. Böylece yangın riski olan bölgeler önceden belirlenebilir, belediye ekipleri müdahaleyi proaktif şekilde planlayabilir.

3.2 Endüstriyel Alan Uygulamaları

Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) veya enerji yoğun üretim tesislerinde sistem, fabrika çatısı, trafo merkezleri, buhar kazanları ve motor üniteleri gibi kritik sıcaklık kaynaklarının sürekli izlenmesi amacıyla kullanılabilir.

Bu uygulama alanlarında sistem, IoT tabanlı enerji yönetim platformlarına entegre edilerek hem yangın önleme hem de enerji verimliliği optimizasyonu görevini üstlenebilir. Örneğin, belirli bir üretim hattında sıcaklık eğilimi beklenenin dışına çıktığında sistem sadece yangın uyarısı değil, aynı zamanda “önleyici bakım” sinyali de üretebilir. Bu durum hem enerji verimliliği hem de iş güvenliği açısından çift yönlü kazanç sağlar.

Endüstriyel entegrasyon senaryosunda sistem, fabrika otomasyon ağına Modbus TCP/IP veya MQTT protokolüyle bağlanabilir. Böylece kontrol odasındaki SCADA veya dijital ikiz platformuna doğrudan veri aktarımı yapılabilir.

3.3 Orman ve Kırsal Alan Uygulamaları

Orman işletmeleri ve kırsal bölgelerde sistem, geniş alan kapsama yeteneği sayesinde yangın risk bölgelerinde etkili bir gözetim aracı olarak kullanılabilir. Kamera düğümleri, yaklaşık 100–150 m menzil aralıklarıyla yerleştirilerek mesh topolojili bir izleme ağı oluşturur. Her düğüm, GPS koordinatıyla birlikte termal veriyi merkeze gönderir ve komşu düğümlerden gelen ısı verileriyle karşılaştırılarak mekânsal doğrulama yapılır.

Bu senaryoda sistem;

- Orman yolları, gözetleme kuleleri ve yangın geçiş koridorları gibi stratejik noktalara yerleştirilebilir,
- Dronlar veya mobil robotlar ile çalışarak hareketli termal görüntü analizi gerçekleştirebilir,
- Bulut tabanlı haritalama üzerinden rüzgâr yönü, nem, radyasyon ve sıcaklık verilerini entegre ederek yangın yayılımını gerçek zamanlı olarak modelleyebilir.

Elde edilen veriler, orman işletme müdürlüklerinin erken müdahale planlarına girdi sağlar. Yangının yayılma hızı, yönü ve olası etki alanı dinamik olarak izlenebilir.

3.4 Ölçeklenebilirlik ve Geleceğe Yönelik Potansiyel

Sistemin mimarisi, ölçeklenebilir ve enerji bağımsız olacak şekilde tasarlanmıştır. Her düğüm, bulut sunucusuna doğrudan veri iletebildiği için yeni düğümler eklenerek sistem coğrafi olarak genişletilebilir. Gelecekte, aşağıdaki entegrasyonlar ile sistemin performansı daha da artırılabilir:

- Dron entegrasyonu: Havadaki termal kameralar ile sabit düğümlerin ısı verileri birleştirilerek 3 boyutlu sıcaklık dağılım haritaları oluşturulabilir.
- Mobil robot platformları: Fabrika içinde veya açık alanda devriye gezerek dinamik izleme yapılabilir.
- 5G tabanlı haberleşme: Gecikme sürelerini düşürmek ve geniş bant veri aktarımı sağlamak için kullanılabilir.
- Makine öğrenmesi destekli anomali tespiti: Zaman serisi verilerinden öğrenen modellerle yanlış alarm oranı minimize edilebilir.

- Karar destek sistemleri: Bulut altyapısına entegre yapay zekâ modülleri ile olayın önem seviyesi, konum ve hava koşullarına göre risk puanı atanabilir.

Bu sayede sistem yalnızca bir yangın tespit aracı değil, aynı zamanda afet öncesi risk tahmini ve karar destek sistemi olarak kullanılabilir.

4. ALGORİTMİK AKIŞ ve PSEUDOCODE

Bu bölümde, geliştirilmeye yönelik olarak tasarlanan termal görüntüleme tabanlı yangın erken tespit sisteminin algoritmik akışı kavramsal düzeyde ele alınmıştır. Sistem henüz fiziksel olarak gerçekleştirilmemiş olup, bu aşamada modelleme ve yazılım mimarisi tasarımı üzerinde durulmaktadır. Tasarlanan yapı iki analiz katmanına dayanmaktadır: Bunlar; Yerel Düğüm (Edge-Level) — sensör düzeyinde ön işleme ve erken uyarı ve Merkezi Kontrol Katmanı (Cloud-Level) — çoklu veri füzyonu, korelasyon analizi ve güven skoru hesaplama katmanlarıdır.

Bu çok katmanlı yaklaşım, ileride gerçekleştirilecek donanım uygulamalarına temel teşkil edecek biçimde erken tespit hızını artırmayı ve yanlış alarm olasılığını azaltmayı hedeflemektedir. Algoritmanın genel veri hattı akışı Şekil 4’te kavramsal olarak sunulmaktadır.



Şekil 4. Olay tespitinden bildirim tetiklemeye kadar veri akışı diyagramı.

4.1 Yerel Düğüm Katmanı (Kavramsal Edge İşleme)

1. Her sensör düğümünün termal kamera ve ESP32 mikrodenetleyici kombinasyonu üzerinden çalışacağı varsayılmaktadır. Bu düzeyde amaç, sensörden alınan termal görüntülerin ön işleme, eşikleme ve bölge tespiti adımlarını gerçekleştirmektir. Henüz gerçek donanımda test edilmemiş olmakla birlikte, öngörülen işlem sırası aşağıdaki biçimdedir:

1. Veri Toplama () Termal kameradan sıcaklık matrisi okunur.
2. Ön İşleme (Filtreleme ve Normalizasyon) Gürültü azaltma için median filtre uygulanır, ardından değerler normalize edilir.

3. Eşikleme ve Bölge Tanımlama koşulunu sağlayan bölgeler “anomali adayı” olarak işaretlenir.
4. Alan ve Zaman Türevi Analizi Her aday için sıcak bölge alanı ve sıcaklık artış oranı hesaplanır.
5. Süreklilik Kontrolü Aynı bölge üç ardışık kare boyunca tespit edilirse, olay “yerel uyarı” (L1) adayı olarak değerlendirilir.

Bu düzeydeki tüm hesaplamalar gömülü yazılım üzerinde çalışacak biçimde modellenmiştir.

4.2 Merkezi Analiz Katmanı

Merkezi istasyonun, birden fazla düğümden gelen alarm verilerini mekânsal ve zamansal olarak karşılaştırarak olayın güvenilirliğini belirlemesi öngörülmektedir. Bu katman, saha kurulumları tamamlandığında yanlış alarm süzme ve karar destek mekanizması olarak görev yapacaktır.

Kavramsal olarak işlem adımları şöyledir:

1. Veri Füzyonu: Tüm düğümlerden gelen veriler zaman damgası ve GPS koordinatına göre hizalanır.
2. Korelasyon Analizi: Komşu düğümler arasında sıcaklık artış eğilimleri karşılaştırılarak korelasyon katsayısı hesaplanır.
3. Güven Skoru Hesabı: Sıcaklık, alan büyüklüğü ve korelasyon katsayısı birlikte değerlendirilerek olayın güven skoru tahmin edilir.
4. Alarm Kararı: Kavramsal olarak alarm üretimi bölüm 2.4’te verilen mantıksal ifadeye göre tanımlanmıştır.

4.3 Kavramsal Sözde Kod

Kavramsal algoritma akışı sözde kod biçiminde Şekil 5’te sunulmuştur. Bu akış, ileride gerçekleştirilecek gömülü yazılım ve sunucu tabanlı sistemin temel algoritmik çerçevesini temsil etmektedir.

```
BEGIN Sanal termal sensör ve ağ modülünü başlat
LOOP Kare  $T(x, t)$  al
  Medyan_filtrele(T) ; Normalleştir(T)
  EĞER  $T(x,y,t) > T_{th}$  \ ISE
    A(t) hesapla,  $\Delta T/\Delta t$ 
    EĞER  $A(t) > A_{th}$  \ TRUE Simüle edilen veri gönder ve L1 yerel uyarısını işaretle
  END
MerkeziBirim:
  Füzyon  $\rightarrow r$  ve C değerlerini hesapla
  EĞER  $(r > 0,8) \wedge (C \geq 0,9) \rightarrow$  Alarm
  L2'yi tetikle, Log bildirimi
END
```

Şekil 5. Sistem yazılımının sözde kod algoritması.

Tablo 3. Kavramsal algoritmanın temel parametreleri.

Parametre	Tanım	Birim	Başlangıç Değeri
	Kritik sıcaklık eşiği	°C	120
	Minimum sıcak bölge alanı	px ²	100
	Sıcaklık artış oranı	°C/s	8
	Korelasyon katsayısı	—	0.8
	Güven skoru	—	0.9
	Süreklilik karesi	—	3

4.4 Gelecek Çalışmalar ve Gerçekleme Planı

Bu aşamada geliştirilen algoritma ve akış, simülasyon tabanlı kavramsal doğrulama niteliğindedir.

Gerçekleştirilecek bir sonraki aşamada:

- ESP32 tabanlı donanım prototipi kurulacak,
- Termal kamera üzerinden gerçek veri toplanacak,
- Parametreler (T_{th} , A_{th} , β) saha koşullarına göre kalibre edilecektir.

Bu doğrultuda çalışma, akademik düzeyde bir ön tasarım olup, gelecekteki saha testleriyle doğrulanacak şekilde planlanmıştır. Sonuç olarak önerilen yapı, yangın erken tespiti için enerji bağımsız, modüler ve ölçeklenebilir bir referans mimari ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu bölümde, termal görüntüleme temelli ve akıllı bildirim özelliklerine sahip kavramsal bir yangın erken tespit sistemi önerilmiştir. Sistem, geleneksel sensör tabanlı yaklaşımların ötesine geçerek görüntü tabanlı sıcaklık analizi ve çoklu kanıt değerlendirme prensiplerini bir araya getirmektedir.

Önerilen mimari, ısı eşiği, alan genişlemesi ve zamansal süreklilik ölçütlerini aynı anda değerlendirerek sahte alarm oranını minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşım, özellikle açık alanlarda (orman, fabrika sahası, sanayi bölgeleri vb.) karşılaşılan yanlış tespit sorunlarını azaltacak ve sistemin güvenilirliğini artıracaktır. Ayrıca, GPS destekli veri paketleme ve çok katmanlı bildirim yapısı (L1–L3) sayesinde olayın hem yerel hem bölgesel hem de merkezi düzeyde eşzamanlı iletimi mümkün hale gelecektir.

Sistemin akıllı bildirim modülü, yalnızca sıcaklık eşik aşımı durumlarında değil, aynı zamanda mekânsal korelasyon analizi ile doğrulanan olaylarda devreye girmektedir. Bu sayede sistemin müdahale süresinin 5 saniyenin altına indirilebileceği ve operasyon merkezlerinin olay hakkında konum, sıcaklık profili ve güven skoru bilgilerine eşzamanlı erişim sağlayabileceği öngörülmektedir.

Çalışma bu noktada kavramsal tasarım ve algoritmik çerçeve sunmaktadır. Gelecekte yapılacak uygulamalı çalışmalarla (örneğin ESP32–MLX90640 donanımı kullanılarak) sistemin gerçek zamanlı performansının test edilmesi ve model doğrulamasının yapılması planlanmaktadır. Bu doğrulama süreci; tespit gecikme süresi, enerji tüketimi, ağ trafiği yükü, güven skoru kararlılığı ve çevresel dayanıklılık gibi metrikleri içerecektir.

Önerilen sistem, yalnızca yangın algılama odaklı bir yaklaşım olarak değil, aynı zamanda IoT tabanlı afet yönetim sistemleri için ölçeklenebilir bir altyapı prototipi olarak da değerlendirilebilir. Bu yönüyle çalışma, hem akademik araştırmalar (örneğin makine öğrenmesiyle anormallik sınıflandırma, spatio-temporal füzyon algoritmaları) hem de endüstriyel Ar-Ge projeleri (örneğin enerji santrali güvenliği, akıllı şehir sensör ağları, fabrika güvenlik altyapıları) için potansiyel bir temel oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma ile geliştirilen kavramsal mimari, gelecekteki prototip ve saha uygulamaları için rehber niteliğinde bir yapı sunmakta; termal görüntüleme, akıllı sensör sistemleri ve veri analitiği birleşiminin yangın erken uyarı teknolojilerinde sağlayabileceği kazanımlara işaret etmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdusalomov, A. B., Islam, B. M. S., Nasimov, R., Mukhiddinov, M., & Whangbo, T. K. (2023). An improved forest fire detection method based on the detectron2 model and a deep learning approach. *Sensors*, 23(3), 1512.
- Deng, L., Wu, S., Zou, S., & Liu, Q. (2025). Large-Space Fire Detection Technology: A Review of Conventional Detector Limitations and Image-Based Target Detection Techniques. *Fire*, 8(9), 358.
- Ghali, R., & Akhloufi, M. A. (2024). Deep learning approach for wildland fire recognition using RGB and thermal infrared aerial image. *Fire*, 7(10), 343.
- Han, Y., Duan, B., Guan, R., Yang, G., & Zhen, Z. (2024). LUFFD-YOLO: A lightweight model for UAV remote sensing forest fire detection based on attention mechanism and multi-level feature fusion. *Remote Sensing*, 16(12), 2177.
- Khan, F., Xu, Z., Sun, J., Khan, F. M., Ahmed, A., & Zhao, Y. (2022). Recent advances in sensors for fire detection. *Sensors*, 22(9), 3310.
- Li, S., Wang, Y., Feng, C., Zhang, D., Li, H., Huang, W., & Shi, L. (2022). A thermal imaging flame-detection model for firefighting robot based on YOLOv4-F model. *Fire*, 5(5), 172.
- Ma, Y., Feng, X., Jiao, J., Peng, Z., Qian, S., Xue, H., & Li, H. (2020, June). Smart fire alarm system with person detection and thermal camera. In *International conference on computational science* (pp. 353-366). Cham: Springer International Publishing.
- Mohapatra, A., & Trinh, T. (2022). Early wildfire detection technologies in practice—a review. *Sustainability*, 14(19), 12270.
- Mukhiddinov, M., Abdusalomov, A. B., & Cho, J. (2022). A wildfire smoke detection system using unmanned aerial vehicle images based on the optimized YOLOv5. *Sensors*, 22(23), 9384.
- Park, S. H., Kim, D. H., & Kim, S. C. (2023). Recognition of IoT-based fire-detection system fire-signal patterns applying fuzzy logic. *Heliyon*, 9(2).
- Sousa, M. J., Moutinho, A., & Almeida, M. (2020). Thermal infrared sensing for near real-time data-driven fire detection and monitoring systems. *Sensors*, 20(23), 6803.
- Yang, X., Li, Y., & Chen, Q. (2024). Automated image-based fire detection and alarm system using edge computing and cloud-based platform. *Internet of Things*, 28, 101402.



Bölüm 3

**RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ KALİTESİ
ANALİZİ: HARMONİK, FREKANS VE
GERİLİM DAVRANIŞLARININ OLAY BAZLI
İNCELENMESİ**

Kadir DOĞANŞAHİN¹

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6763-058X

1 GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi, küresel ölçekte enerji dönüşümünün en önemli bileşenlerinden biri olarak son yıllarda hızla yaygınlaşmış ve artık alternatif bir kaynak olmanın ötesinde, enerji üretiminde önemli bir paya sahip hale gelmiştir. Yenilenebilir ve çevre dostu yapısı sayesinde fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması ve sera gazı salınımlarının düşürülmesine katkı sağlaması, rüzgâr enerjisini ulusal ve uluslararası enerji politikalarında stratejik bir konuma taşımaktadır. Bununla birlikte, rüzgâr türbinlerinin şebekeye entegrasyonu yalnızca çevresel faydalarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda güç sistemlerinin teknik kararlılığı açısından yeni gereksinimleri de beraberinde getirmektedir (Tande, 2012; Heier, 2014, Bölüm 4.3). Bu gereksinimlerin başında, sistem performansını doğrudan etkileyen güç kalitesi yer almaktadır. Güç kalitesi, gerilim kararlılığı, frekans dalgalanmaları, harmonikler, flicker ve geçici olaylar gibi çok boyutlu parametrelerle tanımlanmakta ve sistem güvenilirliğinin temel göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Bollen & Gu, 2006, Bölüm 1.2).

Güç kalitesi, yalnızca bir mühendislik göstergesi değil, aynı zamanda enerji arz güvenliği ve tüketici memnuniyetinin sürdürülebilmesi açısından da kritik öneme sahiptir. Güç kalitesindeki bozulmalar, hem arz tarafında hem de talep tarafında teknik ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Arz tarafında düşük güç kalitesi, üretim sistemlerinin verimini azaltmakta, enerji iletiminde kayıpları artırmakta ve özellikle dönüştürücü ile transformatör gibi ekipmanlarda aşırı ısınma, izolasyon bozulması ve ekipman ömrünün kısalması gibi olumsuz etkiler doğurmaktadır (Arrillaga & Watson, 2003, Bölüm 1; Badrzadeh et al., 2013.). Ayrıca harmoniklerin ve dengesizliklerin artması, şebeke empedansını değiştirerek koruma rölelerinin yanlış çalışmasına ve sistem kararlılığının bozulmasına yol açabilir (Jedrzejczak et al., 2016). Bu durum, özellikle rüzgâr enerjisinin yüksek oranda entegre edildiği bölgelerde, şebeke operatörleri açısından güvenilirlik ve arz sürekliliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır (Almohaimeed & Abdel-Akher, 2020; Chi et al., 2019).

Talep tarafında ise güç kalitesi, son kullanıcıların enerji tüketiminde doğrudan hissedilen bir faktördür. Gerilimdeki harmonik bozulmalar veya flicker etkileri, hassas elektronik cihazlarda arıza, hatalı ölçüm, veri kaybı ve performans düşüşü gibi sorunlara neden olabilmektedir (IEEE Std 519-2014). Endüstriyel tesislerde harmoniklerin yüksek olması durumunda motorlarda moment dalgalanmaları oluşmakta, ısıl kayıplar artmakta ve sistem verimi düşmektedir (Akagi, 2017, Bölüm 1). Ayrıca düşük güç faktörü ve bozulmuş dalga biçimi, kompanzasyon sistemlerinin dengesiz çalışmasına yol açarak reaktif güç cezası gibi ekonomik

kayıplar doğurabilmektedir. Dolayısıyla güç kalitesinin korunması, yalnızca üretici açısından bir sistem güvenliği meselesi değil; aynı zamanda tüketiciler açısından enerji kalitesi, donanım ömrü ve işletme ekonomisi bakımından da belirleyici bir faktördür.

Bu nedenlerle güç kalitesi, hem üretim hem de tüketim tarafında bütüncül biçimde izlenmesi ve yönetilmesi gereken çok boyutlu bir parametredir. Rüzgâr türbinlerinin doğası gereği değişken rüzgâr koşullarına bağlı olarak sürekli dalgalanan bir üretim profiline sahip olması, gerilim ve frekans değerlerinde salınımlara neden olabilmektedir (Su et al., 20013). Bunun yanında, güç elektroniği tabanlı dönüştürücülerin kullanılması, şebekeye yüksek düzeyde harmonik bileşenlerin enjekte edilmesine yol açmakta ve özellikle yüksek penetrasyon seviyelerinde şebeke işletmecileri açısından önemli bir endişe kaynağı oluşturmaktadır (Tentzerakis & Papathanassiou, 2007). Dolayısıyla rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlantısı sonrasında ortaya çıkan harmonikler, geçici gerilim değişimleri ve frekans dalgalanmaları, hem arz hem de talep tarafı için bu dengeyi doğrudan etkilemektedir.

Harmonikler, temel frekansın katları olan sinüzoidal bileşenlerdir ve güç sistemlerinde dalga biçiminin bozulmasına, kayıpların artmasına, trafo ve makinelerde ek ısınmalara, hatta hassas cihazlarda arızalara yol açabilmektedir (Akagi, 2017). Uluslararası standartlar, güç kalitesinin izlenmesi ve değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler önermektedir. Bunlardan en önemlisi IEC 61000-4-30 standardıdır. Bu standart, harmoniklerin, toplam harmonik bozulma (THD), flicker, RMS gerilim ve frekans gibi parametrelerin nasıl ölçülmesi gerektiğini ayrıntılı biçimde tanımlar. Literatürde IEC standardına uygun ölçümler üzerinden rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi etkilerini inceleyen pek çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Bollen ve ark. (2008) rüzgâr türbinlerinin özellikle düşük güçlü şebekelerde harmonik ve flicker etkilerini analiz etmiş; Catalan ve ark. (2023) ise türbinlerin şebekeye harmonik katkılarının kullanılan dönüştürücü tipine bağlı olarak değiştiğini raporlamıştır. Benzer şekilde, Akagi (2017) güç elektroniği elemanlarının harmonik üretimindeki kritik rolünü vurgulamıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise Tentzerakis & Papathanassiou (2007) ile Badrzadeh & Gupta (2021), rüzgâr türbinlerinden kaynaklanan harmoniklerin zamanla değişen karakteristiklere sahip olduğunu ve harmonik spektrumlarının hem çalışma koşullarına hem de şebeke bağlantı noktasındaki empedansa bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Harmoniklerin değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan göstergelerden biri Toplam Harmonik Bozulma (THD) değeridir. THD, temel bileşene oranla harmoniklerin toplam etkisini yüzde cinsinden ifade eder

ve özellikle olay bazlı analizlerde kritik bir göstergedir. Literatürde THD değerlerinin yükseldiği anların incelenmesiyle, türbin ve şebeke arasındaki etkileşimlerin daha net ortaya konabildiği görülmektedir (Badrzadeh, B et al, 2020). Bu tür çalışmalar, yalnızca ortalama değerlerin değil, aynı zamanda geçici olayların (örneğin kesintiler, ani yük değişimleri veya dönüştürücü arızaları) da harmonik profil üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkileri yalnızca harmonik bileşenlerle sınırlı değildir; aynı zamanda frekans ve gerilim dalgalanmaları ile flicker olarak adlandırılan kısa süreli gerilim dalga formu üzerindeki titreşimler de önemli kalite göstergelerindedir. Rüzgâr enerjisi üretimi, doğası gereği rüzgâr hızındaki ani değişimlere bağlı olarak sürekli dalgalanır. Bu dalgalanmalar, türbin jeneratör hızında değişimlere neden olur ve dolaylı olarak gerilim ve frekans kararlılığını etkiler (Slootweg et al., 2001). Özellikle şebekeye doğrudan bağlı sabit hızlı türbinlerde, rüzgâr hızındaki kısa süreli değişimler gerilim genliğinde belirgin salınımlara yol açarken, değişken hızlı sistemlerde ise bu etkiler kısmen dönüştürücü kontrolüyle bastırılabilir (Cai et al. 2024; Heier, 2014, Bölüm 4). Bununla birlikte, yüksek entegrasyon seviyelerinde bu dalgalanmalar şebeke kararlılığını olumsuz etkileyerek frekansın nominal değerden sapmasına, dolayısıyla sistem dengesinin bozulmasına neden olabilir (Tande, 2012, Ackermann içinde; Dugan et al., 2012).

Gerilim dalgalanmalarının en belirgin sonuçlarından biri flicker oluşumudur. Flicker, kısa süreli gerilim salınımlarının aydınlatma sistemlerinde yarattığı gözle algılanabilir ışık titreşimi olarak tanımlanır (Bollen, 2000). IEC 61000-4-15 standardı, flicker'ın değerlendirilmesi için kullanılan Pst (short-term) ve Plt (long-term) göstergelerini tanımlar. Rüzgâr türbinleri, özellikle düşük rüzgâr hızlarında ve değişken aerodinamik tork altında çalışırken, moment dengesizlikleri nedeniyle gerilimde dalgalanmalara sebep olabilmektedir. Bu durum, özellikle zayıf şebelere bağlı türbinlerde veya uzun iletim hatlarıyla sisteme entegre edilen santallerde daha belirgin hale gelmektedir (Larsson, 2002). Flicker etkisi, doğrudan insan konforunu etkilediği gibi, aynı zamanda endüstriyel tesislerde motor sürücüleri ve aydınlatma kontrol sistemleri üzerinde de olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Arrillaga & Watson, 2003).

Bu tür frekans ve gerilim dalgalanmaları, sistemin kararlılığına ilişkin önemli bilgiler sunduğundan, rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkilerinin analizinde harmoniklerle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Literatürde, harmonik bozulmalar ile gerilim/frekans sapsmalarının birlikte izlenmesinin, olay bazlı kalite bozulmalarının tespitinde yüksek doğruluk sağladığı belirtilmiştir (Almohaimed & Abdel-Akher,

2020). Bu çalışmada da benzer şekilde, IEC 61000-4-30 standardına uygun biçimde toplanan 10 dakikalık çözünürlükteki veriler kullanılarak, hem harmonik spektrumların hem de gerilim ve frekans davranışlarının zaman içerisindeki değişimi incelenmiştir. Özellikle THD'nin yükseldiği zaman aralıkları, RMS gerilim değerleri ve flicker parametreleri ile birlikte değerlendirilerek olay tabanlı güç kalitesi bozulmalarına ilişkin bütüncül bir analiz sunulmuştur.

Bu çalışmada, IEC 61000-4-30 standardına uygun olarak elde edilmiş 10 dakikalık çözünürlükteki ölçüm verileri kullanılarak rüzgâr türbininde güç kalitesine ilişkin bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Analizlerde özellikle harmonik spektrumlar, THD değerleri ve olay tabanlı RMS değişimleri ele alınmıştır. Veriler 01.06.2018 – 08.06.2018 tarihleri arasında ölçülmüş olup, tüm zaman serisi boyunca harmoniklerin genel karakteristikleri değerlendirilmiş; ayrıca THD'nin aniden yükseldiği bir olay penceresi belirlenerek (580–589. ölçümler) ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Böylece hem genel harmonik davranışları hem de olay tabanlı anomalilerin güç faktörü ve spektrum üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

1. VERİ İÇERİĞİ ve VERİ ANALİZİNDE YARARLANILAN YÖNTEMLER

1.1. Veri İçeriği

Bu çalışmada kullanılan veriler, bir rüzgâr santraline ait şebeke bağlantı noktasında gerçekleştirilen detaylı güç kalitesi ölçümlerini içermektedir. Ölçümler, 01.06.2018 03:00 ile 08.06.2018 12:50 tarihleri arasında, 10 dakikalık çözünürlükte kaydedilmiştir. Tüm ölçümler, IEC 61000-4-30 standardına uygun biçimde sınıflandırılmıştır (IEC, 2015). Veri seti içeriğinde yer alan ölçümler Tablo – 1'de özetlenmiştir.

Veri toplama sistemi, rüzgâr türbini jeneratör çıkışında ve şebeke bağlantı noktasında eş zamanlı ölçüm yapabilen üç fazlı bir güç analizörü üzerinden yürütülmüştür. Ölçüm sistemi, IEC 61000-4-7 standardına uygun olarak harmonik genliklerini 1. ile 25. harmonikler arasında analiz edebilecek kapasitededir. Bununla birlikte IEC 61000-4-15 standardı kapsamında kısa ve uzun dönem flicker göstergeleri olan Pst ve Plt parametreleri de izlenmiştir (Bollen & Gu, 2006; Larsson, 2002).

Veri dosyası, her 10 dakikalık ölçüm için minimum, maksimum ve ortalama değerleri ayrı sütunlarda sunmaktadır. Bu yapı sayesinde hem zamansal eğilimlerin hem de ani değişimlerin analizi mümkün hâle gelmiştir. Veri setinde ölçülen başlıca parametreler şu şekilde sınıflandırılabilir:

Ölçüm sisteminde kullanılan analizör, IEC Class A doğruluk sınıfına sahip olup, yüksek çözünürlüklü örnekleme frekansı sayesinde harmonik spektrumların güvenilir biçimde çıkarılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece, hem düşük frekanslı (2–5. harmonikler) hem de yüksek frekanslı (15–25. harmonikler) bileşenlerin sistematik olarak incelenebilmesi mümkün olmuştur.

Elde edilen veriler, rüzgâr türbininin şebeke etkileşimini temsil eden bir güç kalitesi penceresi sunmaktadır. Özellikle 10 dakikalık çözünürlük, uluslararası standartlarla uyumlu olarak hem kısa süreli olayların hem de uzun dönemli eğilimlerin izlenebilmesine olanak tanır (IEC, 2015). Bu çözünürlük, istatistiksel analizlerde ortalama davranışların belirlenmesi ve olay tabanlı güç kalitesi bozulmalarının (örneğin THD artışları, RMS düşüşleri, flicker sıçramaları) tespit edilmesi açısından uygun bir denge sağlamaktadır.

Sonuç olarak veri seti, hem harmonik bozulmaların spektral dağılımını, hem de frekans, gerilim ve flicker davranışlarının zamana bağlı değişimlerini incelemeye olanak tanıyan yüksek çözünürlüklü bir ölçüm altyapısına dayanmaktadır. Bu yönüyle, rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkilerinin olay tabanlı ve bütüncül biçimde analiz edilmesine güçlü bir temel sunmaktadır.

Tablo 1 Veri içeriği özeti

Ölçülen Büyüklük	Ölçülen Değişken	Ölçülen değer	Birim
Gerilim RMS	V_1, V_2, V_3, V_N V_{12}, V_{23}, V_{31}	min., maks., ortalama	[V]
Akım RMS	I_1, I_2, I_3 I_N, I_{Aux}	min., maks., ortalama	[A]
Frekans	V_1, V_2, V_3, V_N V_{12}, V_{23}, V_{31} I_1, I_2, I_3 I_N, I_{Aux}	min., maks., ortalama	[Hz]
Gerilim Harmonikleri	V_1, V_2, V_3, V_N V_{12}, V_{23}, V_{31}	25'inci harmoniğe kadar min., maks., ortalama	[%], [V]
Akım Harmonikleri	I_1, I_2, I_3 I_N, I_{Aux}	25'inci harmoniğe kadar min., maks., ortalama	[%], [A]
Gerilim THD	V_1, V_2, V_3, V_N V_{12}, V_{23}, V_{31}	min., maks., ortalama	[%]
Akım THD	I_1, I_2, I_3 I_N, I_{Aux}	min., maks., ortalama	[%]
P_{LT} & P_{ST}	V_1, V_2, V_3, V_N V_{12}, V_{23}, V_{31}	Min Max Average	[V]

Görünür Güç	$\sum S, S_1, S_2, S_3$	min., maks., ortalama	[VA]
Aktif Güç	$\sum P, P_1, P_2, P_3$	min., maks., ortalama	[W]
Reaktif Güç	$\sum Q, Q_1, Q_2, Q_3$	min., maks., ortalama	[VAr]
Güç Faktörü	$\sum(\cos\varphi),$ $\cos(\varphi_1),$ $\cos(\varphi_2), \cos(\varphi_3)$	min., maks., ortalama	[]

1.2. Analiz Yöntemi ve Standartlara Uygunluk

Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz süreci, uluslararası güç kalitesi standartları temel alınarak yapılandırılmıştır. Özellikle IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7 ve IEC 61000-4-15 standartları, verilerin ölçümü, sınıflandırılması ve değerlendirilmesinde temel referans olarak kullanılmıştır. Bu standartlar, güç kalitesine ilişkin parametrelerin ölçümünde kullanılan yöntemleri, zaman aralıklarını ve veri bütünlüğü koşullarını tanımlar (IEC, 2015; IEC, 2009; IEC, 2010).

1.2.1. IEC 61000-4-30 Standardı: Ölçüm yaklaşımı

IEC 61000-4-30 standardı, güç kalitesi ölçümlerinin yapılmasında zaman tabanlı bir sınıflandırma yaklaşımı benimser. Bu standarda göre her bir parametre (örneğin gerilim RMS, frekans, THD, flicker) belirli bir örnekleme süresi ve ortalama aralığına göre hesaplanmalıdır. Bu çalışmada kullanılan veri seti, bu standarda uygun olarak 10 dakikalık ortalama değerlerden oluşmaktadır. Bu zaman aralığı, hem uzun dönemli eğilimleri hem de olay bazlı değişimleri analiz etmeye olanak sağlamaktadır.

IEC 61000-4-30 standardı, ölçüm cihazlarının Class A doğruluk seviyesini sağlaması gerektiğini belirtir. Bu doğruluk sınıfı, özellikle rüzgâr türbinlerinde görülen yüksek dinamikliğe sahip sinyallerin güvenilir biçimde ölçülmesi açısından önemlidir. Ölçüm cihazı, gerilim ve akım sinyallerini gerçek zamanlı olarak örneklemede ve sinyallerin hem temel bileşenlerini hem de harmonik içeriklerini ayrı ayrı hesaplamaktadır.

1.2.2. IEC 61000-4-7 Standardı: Harmonik analizi

Harmonik analizleri, IEC 61000-4-7 standardına uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre harmonik bileşenler, temel frekansın katları olan sinüzoidal bileşenler olarak değerlendirilir ve genlikleri Fourier dönüşümü (FFT) yöntemiyle belirlenir. Analizlerde 1. ile 25. harmonikler arasındaki bileşenler dikkate alınmıştır.

Harmonik genlikleri hem yüzde (%) hem de mutlak (V veya A) cinsinden değerlendirilmiştir. Bu sayede, belirli harmoniklerin hem sistem üzerindeki göreceli etkisi hem de mutlak büyüklüğü karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Ayrıca her bir ölçüm aralığında elde edilen mini-

mum, maksimum ve ortalama değerler ayrı ayrı analiz edilerek harmonik spektrumların zamana bağlı davranışı ortaya konmuştur.

Toplam harmonik bozulma (THD) değeri, IEC 61000-4-7 standardında tanımlandığı üzere aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

1.2.3. IEC 61000-4-15 standardı: Flicker analizi

Gerilimdeki kısa süreli salınımların değerlendirilmesi için IEC 61000-4-15 standardı esas alınmıştır. Bu standartta tanımlanan Pst (short-term) ve Plt (long-term) göstergeleri, flicker seviyelerini sırasıyla 10 dakikalık ve 2 saatlik zaman pencerelerinde tanımlar.

Pst değeri, belirli bir gözlem süresi içinde gerilimdeki dalgalanmaların insan gözüyle algılanabilirlik düzeyini temsil ederken, Plt değeri Pst ölçümlerinin kübik ortalaması alınarak elde edilir. Bu çalışma kapsamında flicker analizi, 10 dakikalık çözünürlükteki Pst değerleri üzerinden yürütülmüştür. Flicker verileri, türbin hızındaki değişimlerin ve aerodinamik tork dengesizliklerinin neden olduğu moment salınımlarının gerilim üzerindeki etkisini incelemeye olanak sağlamaktadır (Larsson, 2002; Bollen & Gu, 2006).

1.2.4. Olay analizi yaklaşımı

Veri setinde yer alan tüm parametreler öncelikle istatistiksel olarak değerlendirilmiş, ardından olay analizi yaklaşımıyla incelenmiştir. Bu kapsamda, THD değerlerinin zamana bağlı değişimleri gözlemlenmiş ve THD'nin en yüksek olduğu zaman aralıkları belirlenmiştir. En yüksek bozulmanın görüldüğü pencere (580–589. ölçümler) “olay aralığı” olarak tanımlanmış ve bu aralıkta harmonik spektrumlar, RMS değerleri, flicker parametreleri ve güç faktörü birlikte analiz edilmiştir.

Bu analiz yaklaşımı, IEC 61000-4-30 standardında önerilen “olay tabanlı kayıt (event recording)” kavramıyla uyumludur. Olay penceresi yaklaşımı, yalnızca ortalama değerlerin değil, kısa süreli bozulmaların da değerlendirilmesini mümkün kılarak, güç kalitesi dinamiklerinin daha doğru biçimde tanımlanmasını sağlar (Dugan et al., 2012).

Bu süreçte kullanılan yazılım ortamı MATLAB R2024b olup, veri okuma, harmonik bileşen seçimi, RMS değişimlerinin çizdirilmesi ve olay aralıklarının vurgulanması için özel komut dizileri geliştirilmiştir. Analiz sürecinin her aşaması, veri bütünlüğünü koruyacak şekilde, aynı zaman etiketlerine dayalı olarak yürütülmüştür.

1.3. Veri İşleme ve Görselleştirme Süreci

Bu çalışmada kullanılan veri seti, çok boyutlu ve yüksek çözünürlüklü olması nedeniyle analiz öncesinde sistematik bir ön işleme sürecinden geçirilmiştir. Verinin işlenmesi, grafiksel olarak değerlendirilmesi ve olay analizinin yürütülmesi aşamalarında MATLAB R2024b yazılımı kullanılmıştır. Bu ortam, büyük boyutlu veri setlerinin yüksek doğrulukla işlenmesine, istatistiksel filtreleme işlemlerinin gerçekleştirilmesine ve görsel analizlerin etkileşimli olarak oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (MathWorks, 2024).

1.3.1. Veri ön işleme aşaması

Veri seti, Microsoft Excel dosyasından *readtable* fonksiyonu aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılmıştır. Veriler 01.06.2018 – 08.06.2018 tarihleri arasındaki dönemi kapsamakta ve her 10 dakikalık zaman aralığı için 900'ün üzerinde değişken içermektedir. Bu değişkenler Tablo – 1'de özetlenmiştir.

Eksik veya hatalı kayıtların kontrolü yapılmış, aykırı değer analizi (outlier detection) uygulanmış ve ölçüm tutarsızlığı bulunan birkaç örnek veri setinden çıkarılmıştır. Silinen verilerin yerine değişken ile ilişkili diğer verilerden yararlanılarak yeni veri ataması yapılmıştır. Bu adım, veri bütünlüğünün korunması ve veri sorunlarının önlenmesi açısından önem taşımaktadır.

1.3.2. THD zaman serisi ve olay penceresi seçimi

Toplam harmonik bozulma (THD), güç kalitesinin en önemli göstergelerinden biri olup, hem gerilim hem de akım için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Çalışmada fazlar arası gerilim (,) için ortalama THD değerleri kullanılmıştır. THD değerlerinin zamana bağlı değişimi, MATLAB ortamında scatter grafikleri ile görselleştirilmiştir. Scatter tipi grafikler, ölçümlerdeki ani değişimleri daha net anlaşılması ve zaman ekseninde olay tabanlı uygunsuzlukların gözlemlenmesi açısından oldukça elverişlidir.

Zaman serisi boyunca elde edilen THD değerlerinin istatistiksel dağılımı incelenmiş ve belirgin bir artışın gözlemlendiği 580'inci ile 589'uncu ölçüm aralığı "olay penceresi" olarak tanımlanmıştır. Bu aralık, yaklaşık 100 dakikalık bir zaman dilimine karşılık gelmekte olup, güç kalitesi parametrelerinde anlık bozulmaların en yoğun biçimde görüldüğü süreye karşılık gelmektedir.

1.3.3. Harmonik spektrumların görselleştirilmesi

Olay penceresinde harmonik davranışların nasıl değiştiğini gözlemleyebilmek amacıyla, gerilimine ait harmonik spektrumlar (2–25. harmonikler) analiz edilmiştir. MATLAB ortamında bu amaçla her bir ölçüm aralığı için harmonik genlikleri ayrı ayrı alınmış, ardından tüm 10 ölçüm, 10×24 boyutlu bir matris olarak düzenlenmiştir.

Bu matris, her satırı bir ölçüm anına, her sütunu ise bir harmonik mertebesine karşılık gelecek şekilde yapılandırılmıştır. Elde edilen spektrumlar, *imagesc* ve *surf* fonksiyonları kullanılarak renk yoğunluklu biçimde görselleştirilmiştir. Bu yöntem, harmonik bileşenlerin hem zamana hem de mertebeye göre değişimini tek bir grafikte göstermeye olanak tanımaktadır.

Ek olarak, temel bileşen (1. harmonik) IEC 61000-4-7 standardına göre 100% kabul edildiğinden, grafiklerde 2–25. harmonikler gösterilmiştir. Bu yaklaşım, harmonik katkıların göreceli etkisini daha net biçimde ortaya koyabilmektedir.

1.3.4. RMS Gerilim ve Akım Değerlerinin Olay Bazlı İncelenmesi

Olay penceresi süresince sistemde meydana gelen olası gerilim veya akım düşüşlerinin belirlenmesi amacıyla, , , gerilimleri ile , , akımlarının RMS ortalama değerleri çizdirilmiştir. Bu grafikler, *subplot (2x1)* düzeninde oluşturularak karşılaştırmalı okuma imkanı sağlanmıştır.

Elde edilen sonuçlarda, olay penceresi süresince hem gerilim hem de akım RMS değerlerinde ani düşüşlerin gözlemlendiği, ancak aynı anda harmonik genliklerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, olası bir yük değişimi, dönüştürücü arızası veya kısa süreli faz dengesizliği olasılığına işaret etmektedir.

Gerilim RMS değerlerinin sıfıra yakın seviyelere düşmesine rağmen bazı harmoniklerin yüksek kalması, ölçüm cihazlarının IEC 61000-4-30 standardına göre ölçüm periyodu boyunca ortalama alma yönteminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle harmonik bileşenler, anlık olarak sıfıra inmemekte; ölçüm penceresi içinde önceki sinyal bileşenlerinin etkisini yansıtmaya devam etmektedir.

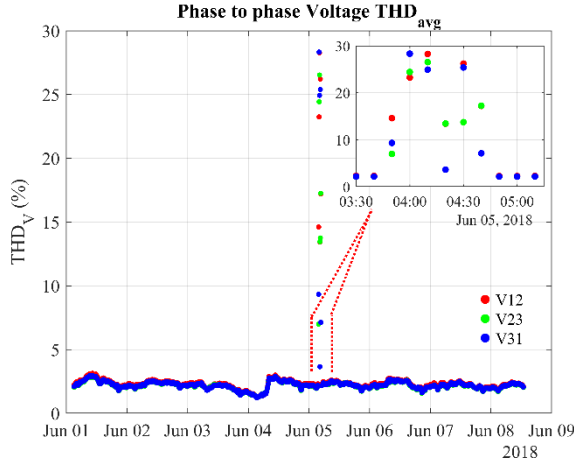
2. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, IEC 61000-4-30 standardına uygun olarak toplanan 10 dakikalık çözünürlükteki veriler üzerinden gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle harmonik bile-

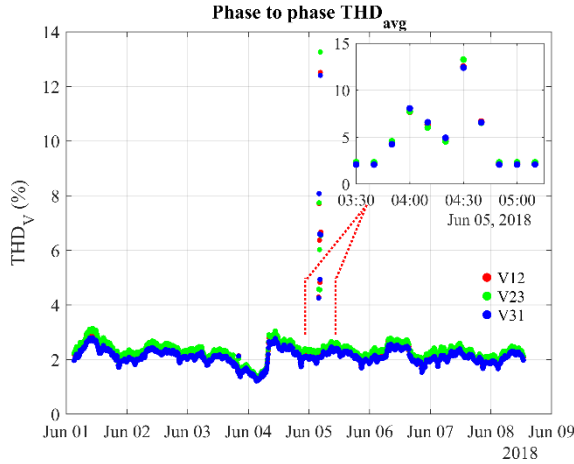
şenlerin zamana bağlı değişimi, THD davranışları, RMS gerilim ve akım değerlerinin eğilimleri ve flicker etkilerinin sistem kararlılığı üzerindeki yansımaları açısından değerlendirilmiştir.

2.1. THD Değerinin Zamanla Değişimi

Gerilim için ortalama fazlar arası THD değerlerinin zaman serisi incelendiğinde, genel olarak sistemin düşük bozulma seviyesinde çalıştığı, ancak belirli zaman aralıklarında anlık artışların gözlemlendiği tespit edilmiştir, Şekil - 1. Bu artışların en belirgin biçimde gerçekleştiği dönem, 580–589. ölçüm aralığı olarak belirlenmiş ve detaylı inceleme için olay penceresi olarak tanımlanmıştır.



(a)



(b)

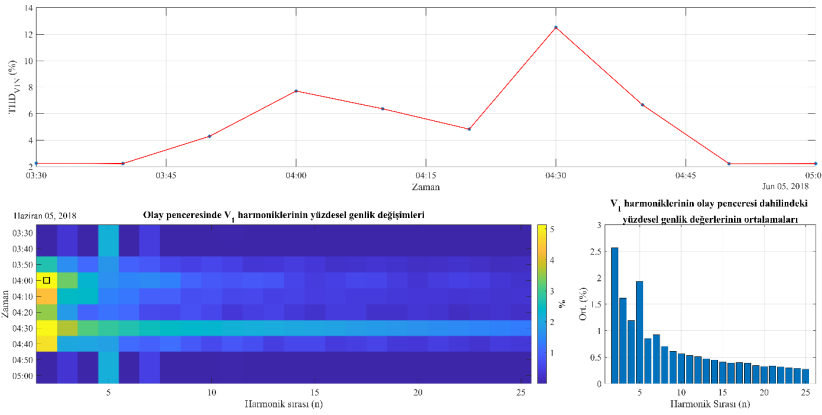
Şekil 1 Fazlararası ve faz-nötr gerilim THD'lerinin zamana bağlı değişimi

Bu pencerede THD değerleri normal çalışma düzeyinin yaklaşık iki katına ulaşmış, bu durum güç kalitesinde geçici bir bozulmayı işaret etmiştir. Benzer gözlemler literatürde de bildirilmiş olup, rüzgâr türbinlerinde moment salınımlarının veya dönüştürücü kontrol devrelerindeki kısa süreli dengesizliklerin THD değerlerinde ani artışlara neden olabildiği raporlanmıştır (Yılmaz & Karabiber, 2018; Wu et al., 2019).

Bu bulgu, güç kalitesi analizlerinde sadece ortalama değerlerin değil, kısa süreli olayların da izlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Ortalama THD'nin düşük olduğu dönemlerde sistem kararlı görünmesine rağmen, kısa süreli bozulmalar şebeke ekipmanları üzerinde yıpratıcı etkiler oluşturabilmektedir (Bollen & Gu, 2006).

2.2. Harmonik Spektrumların İncelenmesi

Olay penceresi süresince elde edilen V1N gerilimine ait harmonik spektrumlar, harmonik bileşenlerin dinamik karakterini açık biçimde ortaya koymuştur. Ortalama spektrum incelendiğinde, temel bileşenin (1. harmonik) baskın olduğu, ancak 2., 3., 5. ve 7. harmoniklerin periyodik olarak yükseldiği gözlenmiştir, Şekil - 2.



Şekil 2 Olay penceresinde harmonik spektrumların değişimi

Özellikle 2. harmonik bileşenin olay penceresinin başlangıcında artış göstermesi, sistemde dengesizlik veya faz asimetrisi ihtimaline işaret etmektedir (Arrillaga & Watson, 2003). Buna karşılık, 5. ve 7. harmoniklerin izleyen zaman adımlarında azalması, bu bozulmanın geçici bir durum olduğunu göstermektedir.

Rüzgâr türbinlerinde düşük rüzgâr hızları veya mekanik tork dengesizlikleri sırasında dönüştürücülerdeki gerilim modülasyonu süreci, düşük dereceli harmoniklerin baskın hale gelmesine neden olabilmektedir (Larsson, 2000). Bu çalışmadaki sonuçlar da benzer bir davranış göster-

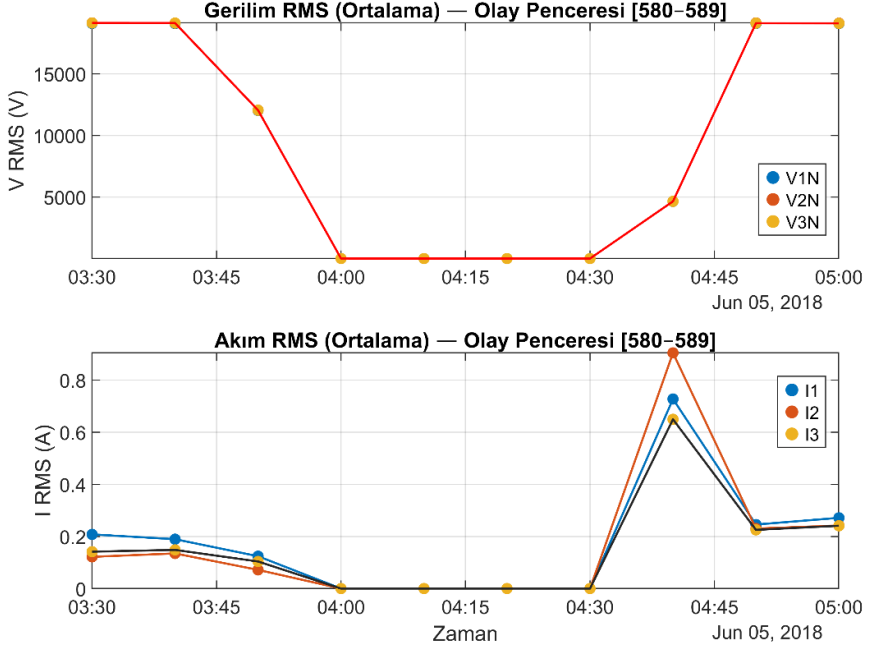
mekte; özellikle 2. harmonik artışıyla eşzamanlı olarak 5. harmonikte düşüş gözlenmektedir. Bu durum, dönüştürücü devresinde asimetrik yük dağılımı veya geçici doygunluk etkileri ile açıklanabilir (Akagi, 2017).

Harmonik spektrumlarının görsel analizi, olay süresince toplam harmonik içeriğin değişimini de ortaya koymuştur. Özellikle olay penceresi sonrasında harmonik bileşenlerin yeniden düşüşe geçmesi, sistemin kendi içinde dengeye dönüş mekanizması sergilediğini göstermektedir. Bu, modern rüzgâr türbinlerinde kullanılan kontrol tabanlı dönüştürücülerin harmonik bozulmayı aktif olarak bastırabildiğini doğrulamaktadır (Badrzadeh & Gupta, 2012).

2.3. Gerilim ve Akım RMS Değerlerindeki Değişimin İncelenmesi

Olay penceresinde faz başına gerilim (,) ve akım (,) RMS değerleri incelendiğinde, THD artışıyla eşzamanlı olarak RMS değerlerinde ani bir düşüş gözlenmiştir. Gerilim RMS değerleri 12 kV seviyesinden ani şekilde yaklaşık 11 V seviyelerine kadar düşerken, akım RMS değerlerinde de paralel bir azalma görülmüştür, Şekil – 3.

Bu ani düşüş, türbinin yük koşullarındaki hızlı bir değişim veya dönüştürücü koruma mekanizmasının devreye girmesiyle ilişkilendirilebilir. Gerilim düşüşü sırasında harmoniklerin yüksek kalmaya devam etmesi, IEC 61000-4-30 standardında tanımlanan ölçüm penceresi ortalaması etkisinden kaynaklanmaktadır; bu durumda harmonik ölçümü, periyodun önceki kısmındaki yüksek genlikli bileşenleri de içermektedir (IEC, 2015).

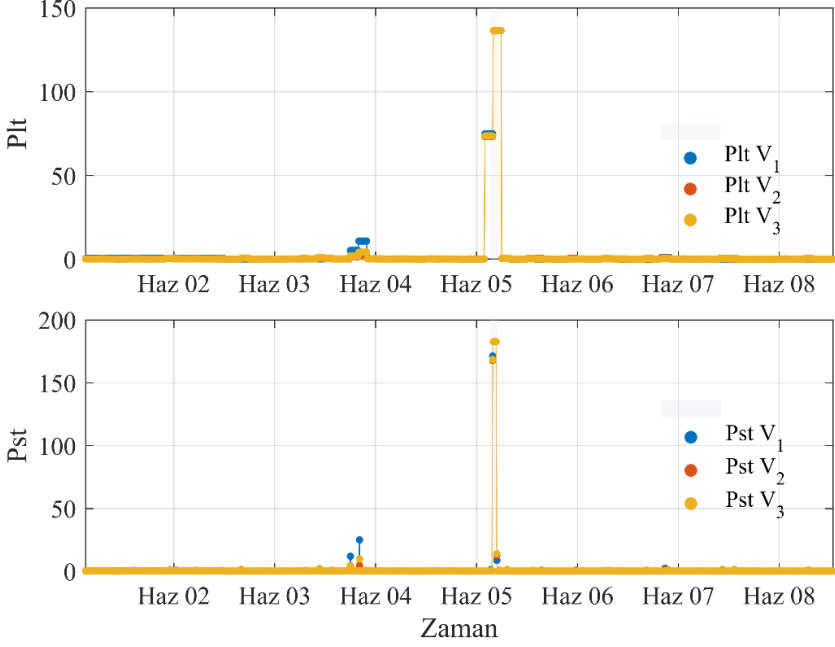


Şekil 3 RMS değerlerin olay penceresindeki değişimleri

Benzer şekilde, literatürde güç elektroniği tabanlı sistemlerde kısa süreli gerilim çökmesi (voltage sag) durumlarında harmonik bozulmanın artabildiği, çünkü dönüştürücülerin dengeleme sırasında anahtarlama frekanslarının değiştiği rapor edilmiştir (Arrillaga, J., & Watson, 2003). Bu durumun geçici bir dengesizlikten kaynaklandığı ve sistemin kısa sürede nominal değerlere döndüğü gözlemlenmiştir.

2.4. Frekans ve Flicker Değişimlerinin İncelenmesi

Rüzgâr türbininin üretim profilinde gözlenen dalgalanmalar, sadece harmonik bileşenlerle sınırlı kalmamış; frekans ve flicker değerlerinde de geçici değişimlere neden olmuştur. Olay penceresi süresince frekans sapmalarının ± 0.05 Hz mertebesinde olduğu, ancak flicker değerlerinin kısa süreli olarak yükseldiği belirlenmiştir.



Şekil 4 Plt ve Pst değerlerinin zamanla değişimi

Pst (kısa süreli flicker) değerinin artışı, türbin rotor hızındaki değişimlerin doğrudan sonucu olarak değerlendirilmiştir. Özellikle düşük rüzgâr hızlarında türbinin moment dengesizliği, gerilimde kısa süreli dalgalanmalara neden olur ve bu durum flicker etkisini artırır (Larsson, 2002). Bu çalışmada gözlenen flicker artışının, harmonik yükselişle eşzamanlı olması, elektriksel ve mekanik etkileşimlerin birleşik etkisini göstermektedir. Bu sonuç, rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi analizinde harmonik, frekans ve flicker parametrelerinin birlikte değerlendirilmesinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Tablo 2 Plt ve Pst değerlerinin olay dışı (0-580 ile 589-1068) ve olay içi (580 – 589 arası) ortalamaları

		Olay dışı ortalama	Olay içi ortalama
Pst		0,341	109,428
		0,257	109,461
		0,270	109,666
Plt		1,780	117,971
		1,586	117,518
		1,631	117,619

2.5. Bulguların Literatürle Karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlar genel olarak literatürdeki bulgularla uyumludur. Yılmaz ve Karabiber (2018) ile Wu et al. (2019), rüzgâr türbinlerinde THD artışlarının genellikle kısa süreli olaylarla (örneğin tork dengesizlikleri veya dönüştürücü geçişleri) ilişkili olduğunu belirtmiştir. Benzer biçimde Akagi (2017), harmonik bileşenlerin dinamik davranışının dönüştürücü anahtarlama stratejilerine bağlı olduğunu vurgulamıştır.

Bu çalışmada ise, olay penceresi yaklaşımı kullanılarak zaman bazlı bozulma dinamiklerinin doğrudan gözlenebilmesi sağlanmıştır. Özellikle 580–589. ölçüm aralığında hem RMS gerilim düşüşü hem de harmonik yükselişi birlikte gözlenmiştir. Bu durum, geçici dengesizliklerin yalnızca bir parametreye bakılarak değerlendirilemeyeceğini göstermekte; bütüncül bir güç kalitesi değerlendirmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, IEC 61000-4-30 standardına uygun biçimde toplanmış 10 dakikalık çözünürlükteki rüzgâr türbini verileri kullanılarak güç kalitesi parametreleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Analizlerde özellikle harmonik spektrumlar, toplam harmonik bozulma (THD), RMS gerilim ve akım değerleri, frekans değişimleri ve flicker etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi üzerinde hem sürekli hem de geçici etkiler oluşturabildiğini açık biçimde ortaya koymuştur.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, güç kalitesi bozulmaları yalnızca uzun dönemli eğilimlerle açıklanamaz; kısa süreli olaylar, özellikle de dönüştürücü davranışları ve rüzgâr hızındaki ani değişimler, sistemin anlık tepkisini belirleyen temel unsurlardır. Bu durum, ortalama THD değerleri düşük olsa dahi, kısa süreli olaylarda harmoniklerin ve flicker seviyelerinin ciddi biçimde artabileceğini göstermektedir.

Olay penceresi olarak tanımlanan 580–589. ölçüm aralığında, THD değerlerinde belirgin bir artış, RMS gerilim ve akım değerlerinde ise ani bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum, güç elektroniği tabanlı dönüştürücülerin geçici rejimlerde oluşturduğu anahtarlama etkilerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Harmonik spektrumlar incelendiğinde, özellikle düşük dereceli harmoniklerin (2. ve 3. harmonikler) artış eğilimi sergilediği, yüksek dereceli harmoniklerin ise bastırıldığı gözlenmiştir. Bu davranış, literatürde bildirilen geçici dengesizlik durumlarıyla uyumludur.

Flicker analizleri, gerilim dalgalanmalarının yalnızca şebeke empedansı veya yük dengesizliğinden değil, aynı zamanda türbinin aerodinamik moment değişimlerinden de etkilendiğini ortaya koymuştur. Özellikle düşük rüzgâr hızlarında flicker değerlerinin yükselmesi, mekanik ve elektriksel etkileşimlerin güç kalitesi üzerindeki birleşik etkisini göstermektedir.

Bu bulgular, rüzgâr türbini kaynaklı güç kalitesi sorunlarının yalnızca harmonik analizine indirgenemeyeceğini; frekans, flicker ve RMS değişimlerinin birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bütüncül yaklaşım, özellikle yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip bölgelerde şebeke güvenilirliğini artırmak için önemlidir.

3.1. Çalışmanın Katkıları

Bu çalışma, literatürdeki benzer araştırmalardan farklı olarak, kısa süreli olay pencerelerine odaklanarak harmonik davranışların dinamik karakterini ortaya koymuştur. IEC standartlarına tam uyumlu olarak yürütülen bu analiz, olay tabanlı güç kalitesi incelemelerinin uygulanabilirliğini göstermiştir.

Ayrıca, MATLAB tabanlı görselleştirme yaklaşımı ile harmonik spektrumlar, RMS eğilimleri ve flicker değerleri eşzamanlı olarak incelenmiş; güç kalitesinin zaman-frekans düzleminde bütünsel olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, gelecekte benzer veri setlerinin analizinde referans teşkil edebilecek bir çerçeve sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Akagi, H. (2017). *Instantaneous power theory and applications to power conditioning* (2. baskı). Wiley-IEEE Press.
- Almohaimed, S. A., & Abdel-Akher, M. (2020). Power quality issues and mitigation for electric grids with wind power penetration. *Applied Sciences*, 10(24), 8852.
- Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power system harmonics* (2. baskı). John Wiley & Sons.
- Badrzadeh, B., & Gupta, M. (2013). Practical experiences and mitigation methods of harmonics in wind power plants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(5), 2279-2289.
- Badrzadeh, B., Gupta, M., Singh, N., Petersson, A., Max, L., & Høgdahl, M. (2012, October). Power system harmonic analysis in wind power plants—Part I: Study methodology and techniques. In 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (pp. 1-11). IEEE.
- Bollen, M. H. J. (2000). *Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions*. IEEE Press.
- Bollen, M. H. J., & Gu, I. Y. H. (2006). *Signal processing of power quality disturbances*. Wiley-IEEE Press.
- Bollen, M. H. J., Yang, Y., & Hassan, F. (2008, September). Integration of distributed generation in the power system—a power quality approach. In 2008 13th international conference on harmonics and quality of power (pp. 1-8). IEEE.
- Cai, X., Yang, Z., Liu, P., Lian, X., Li, Z., Zhu, G., & Geng, H. (2024). Voltage Control Strategy for Large-Scale Wind Farm with Rapid Wind Speed Fluctuation. *Energies*, 17(9), 2220.
- Catalan, P., Wang, Y., Arza, J., & Chen, Z. (2023). A comprehensive overview of power converter applied in high-power wind turbine: Key challenges and potential solutions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(5), 6169-6195.
- Chi, Y., Tang, B., Hu, J., Tian, X., Tang, H., Li, Y., ... & Shuai, L. (2019). Overview of mechanism and mitigation measures on multi-frequency oscillation caused by large-scale integration of wind power. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 5(4), 433-443.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2012). *Electrical power systems quality* (3. baskı). McGraw-Hill Education.
- Heier, S. (2014). *Grid integration of wind energy: Onshore and offshore conversion systems* (3. baskı). Wiley.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2009). *IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). *IEC 61000-4-15:*

- Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*. IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2015). *IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. IEC.
- IEEE Standards Association. (2014). *IEEE Std 519-2014: IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems*. IEEE.
- Jedrzejczak, J., Anders, G. J., Fotuhi-Firuzabad, M., Farzin, H., & Aminifar, F. (2016). Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 556-564.
- Larsson, Å. (2000). The power qualities of wind turbines. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
- Larsson, A. (2002). Flicker emission of wind turbines during continuous operation. *IEEE transactions on Energy Conversion*, 17(1), 114-118.
- MathWorks. (2024). *MATLAB R2024a documentation*. The MathWorks, Inc.
- Slootweg, J. G., Polinder, H., & Kling, W. L. (2001, July). Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator. In 2001 Power engineering society summer meeting. Conference proceedings (Cat. No. 01CH37262) (Vol. 1, pp. 644-649). IEEE.
- Su, C., Hu, W., Chen, Z., & Hu, Y. (2013). Mitigation of power system oscillation caused by wind power fluctuation. *IET Renewable Power Generation*, 7(6), 639-651.
- Tande, J. O. (2012). İçinde Ackermann, T. (Ed.). *Wind power in power systems* (İkinci baskı, ss. 159-173). Wiley.
- Tentzerakis, S. T., & Papathanassiou, S. A. (2007). An investigation of the harmonic emissions of wind turbines. *IEEE transactions on energy conversion*, 22(1), 150-158.



Bölüm 4

ALTI SEVİYELİ HİSTEREZİS AKIM BANTI İLE DA MOTORU HIZ DENETİMİ

Mehmet KARAYEL¹, Teyfik ATAMAN²

¹ Mehmet KARAYEL, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Elektrik Programı, Çankırı/Türkiye. mkarayel@karatekin.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-7155-8288.

² Teyfik ATAMAN, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Çankırı/Türkiye, tevfikataman@karatekin.edu.tr, Orcid ID:0000-0003-1346-5651

1. GİRİŞ

Doğru akım (DA) motorları, yüksek güç yoğunluğu, basit yapısı, yüksek verimlilik, güvenilirlik, hassas hız-pozisyon denetimi vb. gibi çok sayıda özelliklere sahip olması nedeniyle enerji, otomotiv, sivil ve askeri havacılık, medikal, endüstri ve robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-5]. DA motorların verimlilik, hassasiyet ve güvenilirliğini korumak için uygun denetleyici kullanımı esastır. Literatürde DA motoru hız denetimi uygulamaları için Dahili Model denetleyici [6], Doğrusal Kuadratik Regülatör denetleyici [7], PID denetleyici [8,9], Kaydırma Mod denetleyici [10], Eğimli İntegral Türev (TID) denetleyici [11], 1PDF-PI denetleyici [12], Kesirli Mertebeden PID (FOPID) denetleyici [13, 14], Uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) denetleyici [15] gibi farklı yapıcıda denetleyiciler kullanılmaktadır. Denetleyici seçimi sistemin performans gereksinimine ve görev önceliğine bağlıdır.

DA motor sürücü sistemi genellikle DA kaynaklı inverterden beslenir. Sürücü sistemindeki denetleyicinin temel amacı motorun dönüş hızını belirli bir hız değerinde sabit tutmaktır. DA motor hızı, motora besleyen inverterin çıkışındaki DA gerilimi ile doğru orantılıdır. Burada denetleyici, referans hız değeri ile gerçek hız değeri arasındaki farka bağlı olarak darbe genişlik modülasyonu (DGM) stratejisi ile inverterin güç anahtarları için sabit genlikli ON-OFF sinyallerini üretir. Üretilen bu sinyaller ile inverter çıkış gerilimini elde edilir. Uzay vektörü DGM, sinüzoidal DGM, PID ve histerezis akım denetleyici vb. gibi birçok DGM tekniği türü vardır

PID denetleyiciler, uygulama ve ayarlama kolaylığı, düşük maliyet ve güç ve gelişmiş teknikler, karmaşıklık ve hesaplama talepleri olmaksızın tatmin edici performansları nedeniyle endüstride hayati bir rol oynar. Ayrıca, denetleyicinin ayar parametreleri, bulanık mantık kontrolü [16,17] sinir ağları [18] aracılığıyla yumuşak hesaplamaya veya sistem yanıtını yeterince iyileştiren farklı metasezgisel algoritmalara [19] dayanır. PID denetleyici, sistem yanıtlarını iyileştiren bir hız kontrol işlemi sistemiyle basamaklandırılır. Ancak, sıcaklık, yük, sürtünme ve çevresel faktörlerin zamanla değişen yapısı, DC motorun parametrelerinde dalgalanma meydana getirir, bu durum denetleyicinin sistem davranışlarını tahmin etmeyi ve sağlam denetim stratejileri geliştirmeyi zorlaştırır. Parametrelerdeki belirsizlikler ve ön görülemeyen bozulmalar DA motor sürücü performansı üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Bu

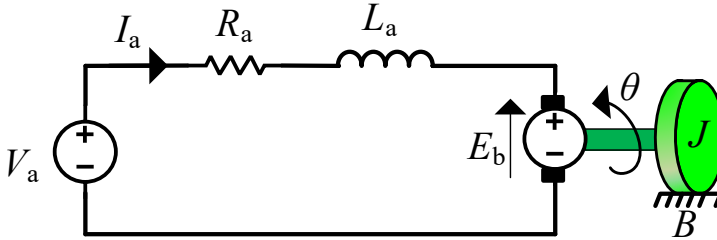
nedenle DA motoru sağlam denetleyici sistemlerine ihtiyaç duyar. Burada, sistem parametrelerinden bağımsız doğrusal olmayan yük sistemlerinde kararlı çalışabilen histerisiz denetleyici etkili bir performansa sahiptir.

Histerisiz akım denetleyici, sistemden geçen akımın bir pozitif-negatif bant aralığında referans akımını takip etmeye zorlayan, uygulaması kolay, hızlı geçiş tepkisine sahip, sistem parametre değerlerinden bağımsız kararlı ve dinamik performansa sahip denetim yapabilen bir DGM yöntemidir. Histerisiz akım denetiminin en önemli dezavantajı değişken anahtarlama frekansları ve yüksek akım dalgalanmalarıdır. Histerisiz bant genişliği, anahtarlama frekansını ve tepeden tepeye akım dalgalanmasını etkiler. Anahtarlama frekansı ayrıca histerezis bandının yanı sıra anahtarlama ve iletim kayıplarından da doğrudan etkilenir. Histerezis bandını genişleterek anahtarlama frekansı azaltılabilir.

Bu çalışmada DA motor hız denetimi için sistem parametre değişimlerinden etkilenmeyen kararlı ve dinamik performansa sahip, ayrıca yüksek anahtarlama frekansları ve akım salınımları gibi histerisiz akım denetleyicinin olumsuz etkilerini önemli ölçüde azaltan çok seviyeli bir histerisiz akım denetleyici topolojisi sunulmaktadır.

2. DA MOTOR MODELİ

DA motor hız denetimi işlemi stator sargılarına uygulanan gerilimin ayarlanması ile sağlanmaktadır. Şekil 1'de gösterilen DA motorun eşdeğer devresine Kirchhoff'un gerilim yasası ve Newton'un ikinci hareket yasası uygulandığında motorun davranışını yöneten denklemler Denklem 1-3 ile temsil edilmektedir.



Şekil 1. DA motor eşdeğer devresi.

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_b \quad (1)$$

Burada, V_a statora uygulanan gerilim, i_a stator akımı, R_a stator sargı direnci, L_a stator sargı endüktansı ve E_b ise zıt EMK değerlerini ifade etmektedir. Stator sargılarına uygulanan gerilim denetiminde alan akısı her zaman sabit ve E_b zıt EMK açısal hız ile orantılıdır.

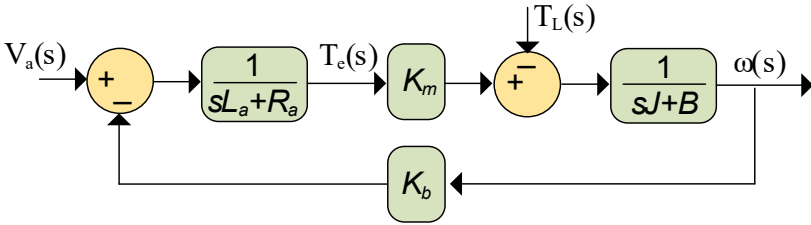
$$E_b = K_b \frac{d\theta}{dt} = K_b \omega \quad (2)$$

Burada, K_b zıt EMK sabitidir. Motorun çıkış momenti stator sargılarından geçen akım ile doğru orantılıdır ve net moment ifadesi Denklem 3'teki gibidir.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = K_m i_a \quad (3)$$

Burada, T_e ve T_L sırasıyla motor ve yük momentini, J atalet momentini, B sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

Denklem 1, 2 ve 3'te verilen eşitliklere Laplace dönüşümleri uygulanarak Şekil 2'de gösterilen DA motor hız denetim sisteminin kapalı döngü blok şeması elde edilmektedir.



Şekil 2. DA motor hız denetim sistemi blok şeması

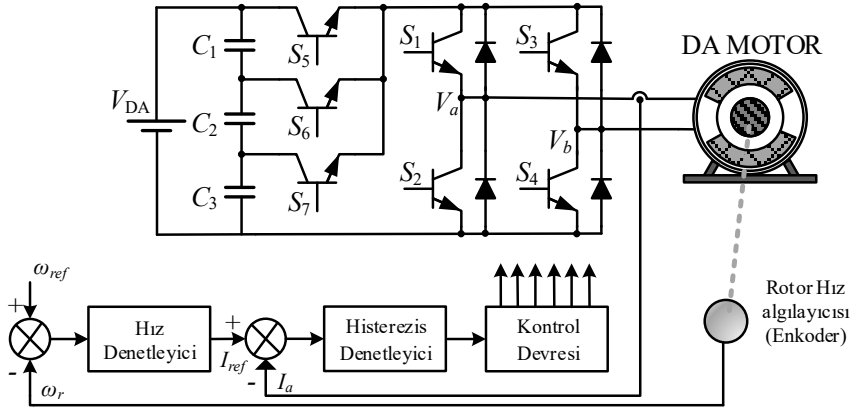
Tablo 1'de önerilen DA motor sürücü sistemi topolojisinin performansını test ederken kullanılan DA motorunun parametreleri bulunmaktadır.

Tablo 1. DA motor parametreleri.

Motor Parametreleri	Değeri
Stator Endüktansı - L_a (Henry)	0.016
Stator Direnci - R_a (Ohm)	0.78
Rotor Ataleti - J (kg m^2)	0.05
Besleme Gerilimi - V_a (Volt)	240
Sürtünme Katsayısı - B_m (Nm/s/rad)	0.01
Moment sabiti - K_m (Nm/A)	0.015
Zıt EMK sabiti - K_b (V s/rad)	0.05

3. ÖNERİLEN ÇOK SEVİYELİ HİSTEREZİS DA MOTOR HIZ DENETLEYİCİ TOPOLOJİSİ

Bu bölümde, kademeli H köprü çok seviyeli histerezis bant DA motor hız denetimi topolojisi, çalışma prensibi ile ilgili konular ele alınmaktadır. Şekil 3'te önerilen çok seviyeli histerezis DA motor sürücü sistemi topolojisi gösterilmektedir. Önerilen topoloji bir adet 240 V gerilim kaynağı (V_{DA}), 3 adet 1000 μF kondansatör (C_1 , C_2 ve C_3) ve S_1 'de S_7 'e kadar numaralanmış IGBT güç anahtarından meydana gelmektedir.



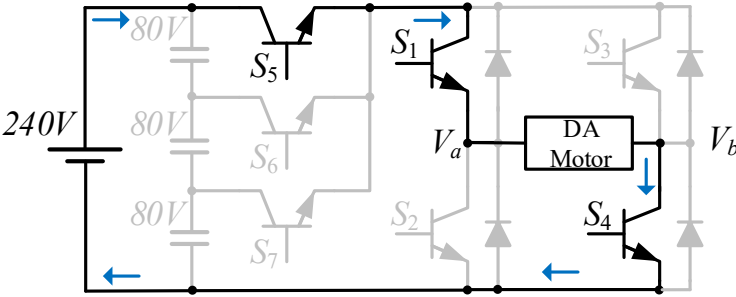
Şekil 3. Önerilen çok seviyeli histerezis DA motor sürücü sistemi topolojisi.

3.1. ÇALIŞMA MODLARI

Bu bölümde önerilen topolojinin sabit durumda üretilen motora uygulanan farklı gerilim seviyeleri için anahtarlama durumları ve elde edilen gerilim seviyeleri açıklanmaktadır. Sürücü sisteminin DA gerilim kaynağı

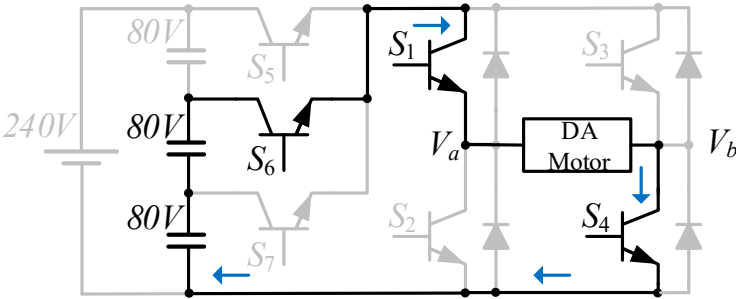
(V_{DA}) 'na paralel, birbirlerine seri bağlı kondansatörler V_{DA} gerilimini eşit olarak paylaşmaktadır. Yani, $V_{C1}=V_{C2}=V_{C3}=V_{DA}/3$.

Mod 1: Şekil 4'te gösterildiği gibi DA motorun giriş gerilimi (V_a) doğrudan V_{DA} kaynağına bağlı ve S1, S4, S5 anahtarları iletim durumundadır. Motordan geçen i_a akımı ileri yönlüdür. Yani, $V_a=240V$



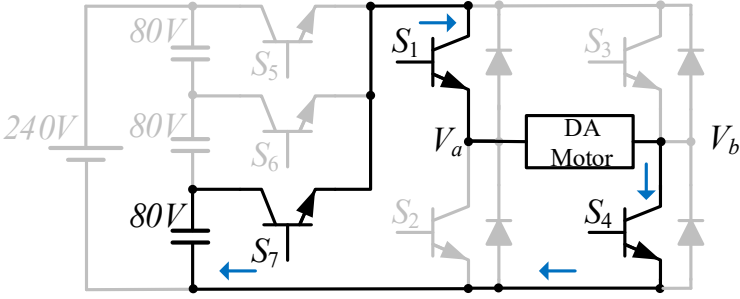
Şekil 4. Mod 1 çalışma durumu.

Mod 2: Şekil 5'te gösterildiği gibi DA motorun giriş gerilimi (V_a) doğrudan iki seri kondansatöre bağlı ve S1, S4, S6 anahtarları iletim durumundadır. Motordan geçen i_a akımı ileri yönlüdür. Yani, $V_a=160V$ 'tur.



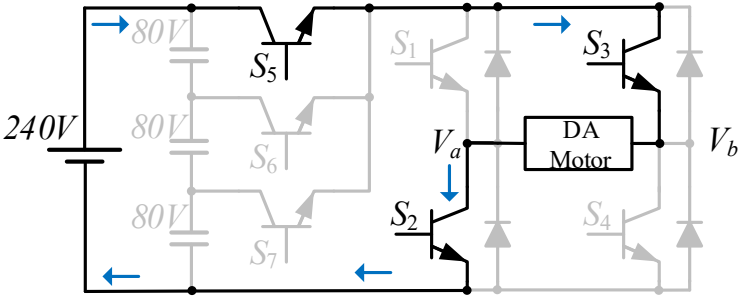
Şekil 5. Mod 2 çalışma durumu.

Mod 3: Şekil 6'te gösterildiği gibi DA motorun giriş gerilimi (V_a) doğrudan bir kondansatöre bağlı ve S1, S4, S7 anahtarları iletim durumundadır. Motordan geçen i_a akımı ileri yönlüdür. Yani, $V_a=80V$ 'tur.



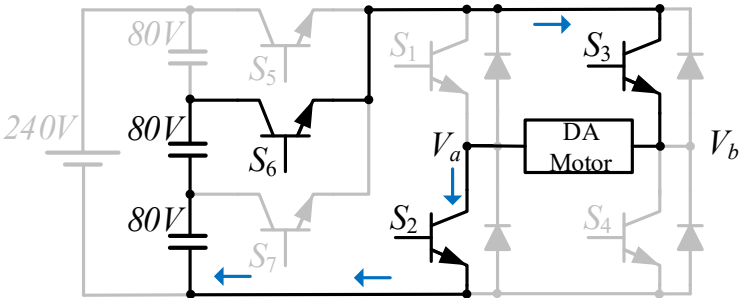
Şekil 6. Mod 3 çalışma durumu.

Mod 4: Şekil 7’te gösterildiği gibi DA motorun giriş gerilimi (V_a) doğrudan V_{DA} kaynağına bağlı ve S2, S3, S5 anahtarları iletim durumundadır. Motordan geçen i_a akımı geri yönlüdür. Yani, $V_a = -240V$ ’tur.



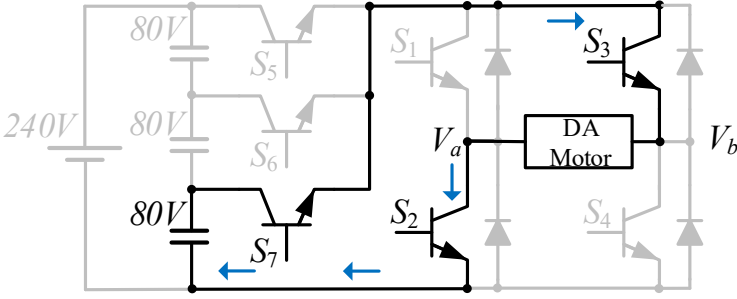
Şekil 7. Mod 4 çalışma durumu.

Mod 5: Şekil 8’de gösterildiği gibi DA motorun giriş gerilimi (V_a) doğrudan iki seri kondansatöre bağlı ve S2, S3, S6 anahtarları iletim durumundadır. Motordan geçen i_a akımı geri yönlüdür. Yani, $V_a = -160V$ ’tur.



Şekil 8. Mod 5 çalışma durumu.

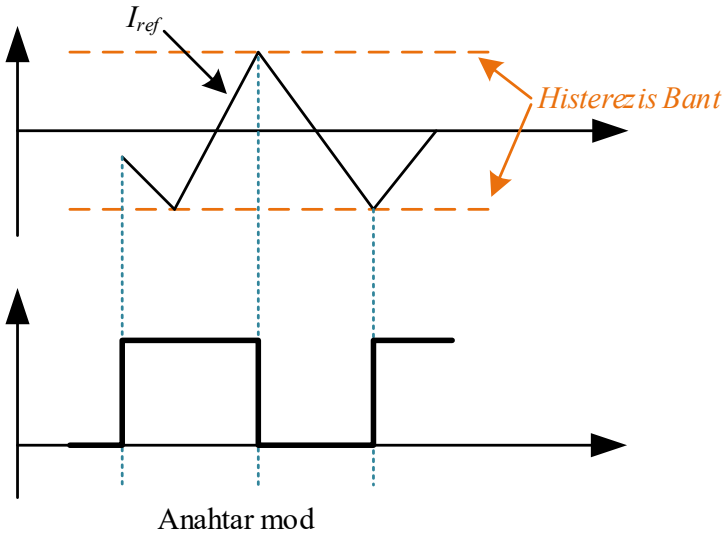
Mod 6: Şekil 9’da gösterildiği gibi DA motorun giriş gerilimi (V_a) doğrudan bir kondansatöre bağlı ve S2, S3, S7 anahtarları iletim durumundadır. Motordan geçen i_a akımı geri yönlüdür. Yani, $V_a = -80V$ ’tur.



Şekil 9. Mod 6 çalışma durumu.

4. BENZETİM SONUÇLARI

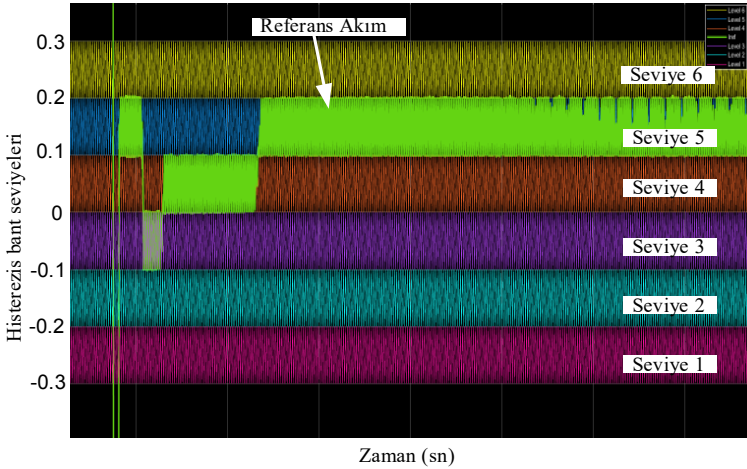
Geleneksel iki seviyeli histerezis akım kontrolü, Şekil 10’da gösterildiği gibi bir akım hatasını (yani ölçülen ve hız denetleyicisinden üretilen referans akım arasındaki farkı) sabit bir histerezis bandıyla karşılaştırarak çalışır. Hata alt histerezis sınırının altına düştüğünde, H köprü evirici devresindeki ilgili güç anahtarı (S_1) iletimde, hata üst histerezis sınırının üzerine çıktığında ise S1 anahtarı kesimde olur.



Şekil 10. Geleneksel Histerezis akım denetimi yapısı.

Geleneksel iki seviyeli histerezis akım denetiminde sadece iki gerilim seviyesi olduğundan nispeten akım düzenlemesi daha basittir. Ancak hata değerini en düşük seviyede tutmak için histerezis bant aralığı çok küçük olması gerekir. Bu da güç anahtarlarının yüksek frekansta anahtarlmasına, anahtarlama kayıplarının artmasına ve evirici çıkış akımında yüksek genlikli salınımlara neden olmaktadır.

Önerilen çok seviyeli histerezis akım denetiminde ise Şekil 11’de gösterildiği gibi pozitif polaritede 3, negatif polaritede 3 farklı seviyelere sahip toplam 6 histerezis bantlı denetim gerçekleştirilmektedir.



Şekil 10. Geleneksel Histerezis akım denetimi yapısı.

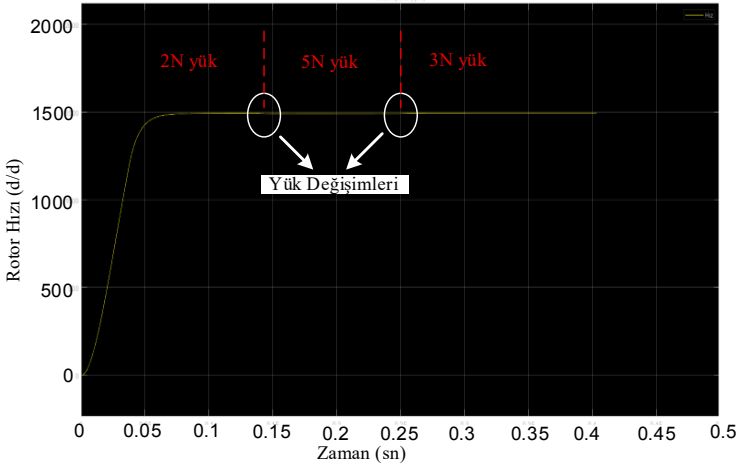
Akımın referans (I_{ref}) değeri hangi seviyedeki histerezis bantına denk geliyorsa o moda anahtarlama yapılmaktadır. Histerezis bant seviyelerine göre çalışma modları Tablo 2’de verilmektedir. Bu sayede I_{ref} değerine göre farklı gerilim seviyelerinde histerezis denetim yapılarak DA motoruna uygulanan akım değerinde salınımlar ve yüksek anahtarlama önemli derecede azaltılmaktadır.

Tablo 2. Histerezis bant seviyeleri ve çalışma modları.

Histerezis bant	Akım İleri Yönlü	Akım Geri Yönlü
Seviye 1	Mod 1	Mod 4
Seviye 2	Mod 2	Mod 5
Seviye 3	Mod 3	Mod 6
Seviye 4	Mod 3	Mod 6

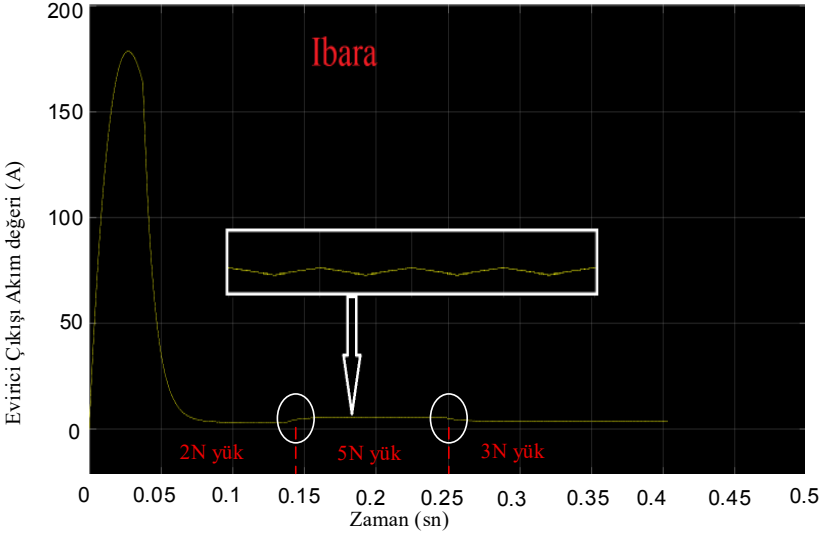
Seviye 5	Mod 2	Mod 5
Seviye 6	Mod 1	Mod 4

Bu çalışmada, önerilen çok seviyeli histerezis akım bandı ile DA motor hız denetiminin etkinliğini vurgulamak için farklı hız ve yük değerlerinde performansı test edilmiştir. Şekil 11’de DA motorun 1500 d/d nominal hızındaki yük değişimine tepkisi gösterilmektedir.



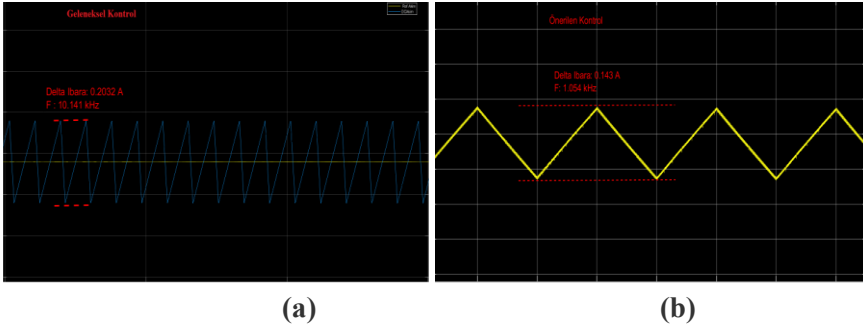
Şekil 11. DA motorun 1500 d/d nominal hızındaki yük değişimine tepkisi.

Şekil 11 incelendiğinde önerilen topolojinin motorun nominal 1500 d/d hız değerinde yük değişimine hız tepkisinin çok etkili olduğu ve motoru referans hız değerinde sabit tuttuğu görülmektedir. Şekil 12’de 11’de DA motorun 1500 d/d nominal hızındaki yük değişimine bağlı motorun çektiği evirici çıkış akım değeri gösterilmektedir.



Şekil 12. DA motorun 1500 d/d nominal hızındaki yük değişimine bağlı motorun çektiği evirici çıkış akımı.

Şekil 13'te 1500 d/d hız ve 5 N yük değerinde geleneksel iki seviyeli histerezis akım denetleyici ile çok seviyeli histerezis akım denetleyici kullanılan DA motor sürücü topolojisinin evirici çıkış akımı (i_a) gösterilmektedir.

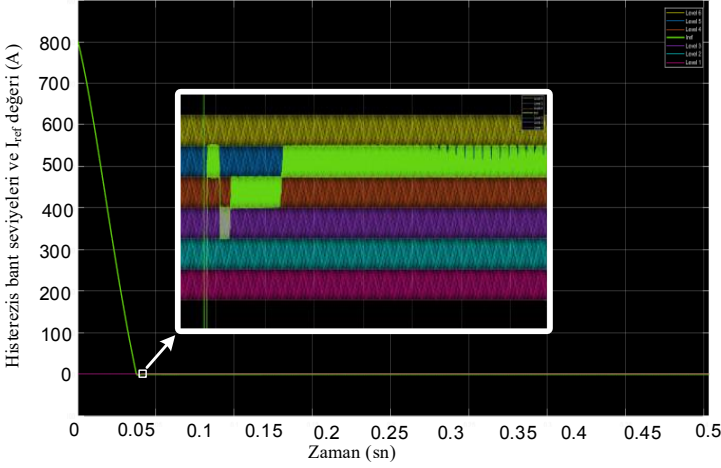


Şekil 13. DA motor akımı değeri (a) geleneksel yöntem, (b) önerilen yöntem.

Şekil 13 incelendiğinde, geleneksel yöntem kullanıldığında motor akımındaki salınım 0.2032 A ve anahtarlama frekansı 10.141 KHz iken önerilen topolojide ise motor akımındaki salınım 0.143 A ve anahtarlama frekansı 1.054 KHz'dir. Önerilen yöntemin geleneksel yöntemle

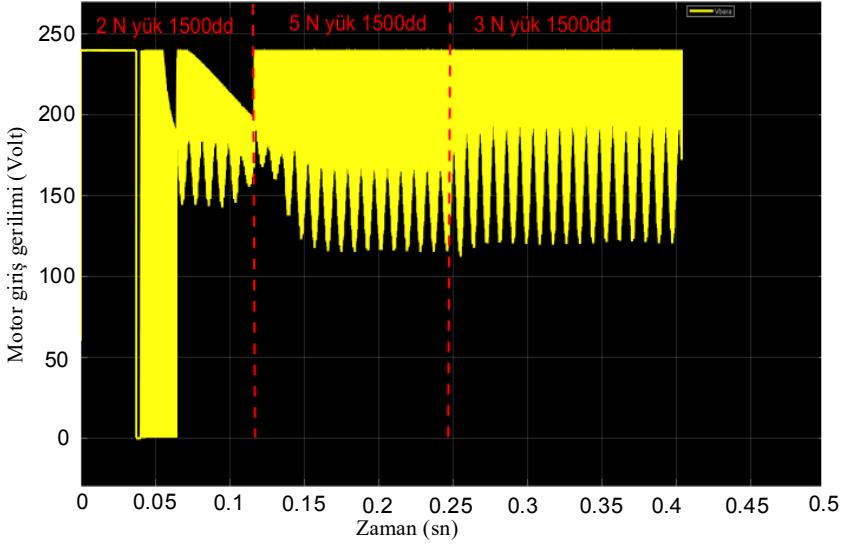
karşılaştırıldığında histerezis denetime bağlı motor akım salınımı ve anahtarlama frekansında çok belirgin bir şekilde iyileşme elde edildiği açıkta görülmektedir.

Şekil 14'te 1500 d/d hız ve 5 N yük değerinde histerezis bant seviyelerine bağlı referans akım değerinin değişimi ve büyütülmüş hali gösterilmektedir.



Şekil 14. 1500 d/d hız ve 5 N yük değerinde histerezis bant seviyelerine bağlı referans akım değerinin değişimi.

Şekil 15'te 1500 d/d hız ve farklı yük değerlerinde Şekil 14'te gösterilen histerezis bant seviyelerine ve Tablo 2'de verilen çalışma modlarına bağlı olarak DA motora uygulanan giriş gerilimi gösterilmektedir. Bura



Şekil 15. DA motoruna uygulanan evirici çıkış gerilimi.

Şekil 15'te sürücü sistemi başlangıçta ilk 0.06 sn'ye kadar sürücü geleneksel histerezis denetimi modunda çalıştırılmaktadır. Burada histerezis bant seviyesine bağlı olarak güç anahtarları tek modda çalışmakta ve evirici çıkış gerilimi 0 ile 240 V aralığında anahtarlanmaktadır. 0.06 sn'den sonraki zamanlarda ise sürücü önerilen topoloji ile çalıştırılmakta ve evirici çıkış gerilimi farklı seviyelerde anahtarlanmaktadır. Bu sayede motor akımı hem daha az salınım yapmakta hem de daha düşük anahtarlama frekansına ihtiyaç duymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada DA motor hız denetimi için sistem parametre değişimlerinden etkilenmeyen kararlı ve dinamik performansa sahip, ayrıca yüksek anahtarlama frekansları ve akım salınımları gibi histerisiz akım denetleyicinin olumsuz etkilerini önemli değerde azaltan çok seviyeli bir histerisiz akım denetleyici topolojisi sunulmaktadır.

Önerilen topolojinin etkinliği vurgulamak geleneksel iki seviyeli histerezis akım denetleyici ile performansı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde önerilen topoloji ile DA motor akım salınımları %42.10 iyileştirme ve anahtarlama frekansında ise yaklaşık 9 kat daha düşük anahtarlama gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Maghfiroh, H., Nizam, M. & Praptodiyono, S. PID optimal control to reduce energy consumption in DC-drive system. *Int J Pow Elec & Dri Syst* ISSN, 2088(8694), p.2165. (2020).
2. Şahin M. Designing MPC algorithms for velocity control of brushed DC motor and verification with SIL tests. *Automatika*. 2023;64:399–407.
3. Rahman, M. S., Rafsy, Y. T. H., Sarker, M. R. & Shahjalal, M. March. Design of a PID Controller-Based Permanent Magnet DC Motor Driven Conveyor Belt System for Industrial Automation. In *2024 International Conference on Advances in Computing, Communication, Electrical, and Smart Systems (iCACCESS)* (pp. 1–6). IEEE. (2024).
4. Mohanty, M. D., Pattnaik, D., Parida, M., Mohanty, S. & Mohanty, M. N. Design of intelligent PID controller for smart toilet of CCU/ICU patients in healthcare systems. In *International Conference on Intelligent Computing and Applications: Proceedings of ICICA 2018* (pp. 97–107). Springer Singapore. (2019).
5. Batool A, Ain Nu, Amin AA, et al. A comparative study of DC servo motor parameter estimation using various techniques. *Automatika*. 2022;63:303–312.
6. Prakosa, J. A. et al. Experimentally robustness improvement of DC motor speed control optimization by H-infinity of mixed-sensitivity synthesis. *Int. J. Dynamics Control*. 10 (6), 1968–1980 (2022).
7. Kızmaz, H. Comparative analysis of Optimal Control Strategies: LQR, PID, and sliding Mode Control for DC Motor position performance. *Gazi Univ. J. Sci. Part. A: Eng. Innov.* 10 (4), 571–592 (2023).
8. Puangdownreong, D., Hlungnamtip, S., Thammarat, C. & Nawikavatan, A. March. Application of flower pollination algorithm to parameter identification of DC motor model. In *2017*

International Electrical Engineering Congress (iEECON) (pp. 1–4). IEEE. (2017).

9. Izci, D. & Ekinci, S. Comparative performance analysis of Slime Mould Algorithm for efficient design of proportional-integral-derivative Controller. *Electrica*, 21(1). (2021).
10. Saputra, D. D. et al. Performance evaluation of sliding mode control (SMC) for Dc motor speed control. *Jurnal Ilmiah Teknik ElektroKomputer Dan. Informatika*. 9 (2), 502–510 (2023).
11. Amieur, T., Taibi, D., Kahla, S., Bechouat, M. & Sedraoui, M. Tilt-fractional order proportional integral derivative control for DC motor using particle swarm optimization. *Electr. Eng. Electromechanics*, (2), pp.14–19. (2023).
12. Celik, E. & Karayel, M. Effective speed control of brushless DC motor using cascade 1PDF-PI controller tuned by snake optimizer. *Neural Comput. Appl.* 36 (13), 7439–7454 (2024).
13. Ekinci, S., Izci, D. & Hekimoglu, B. Optimal FOPID speed control of DC motor via opposition-based hybrid manta ray foraging optimization and simulated annealing algorithm. *Arab. J. Sci. Eng.* 46 (2), 1395–1409 (2021).
14. Izci, D. & Ekinci, S. Fractional order controller design via gazelle optimizer for efficient speed regulation of micromotors. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6, p.100295. (2023).
15. Sonugür, G. (2025). Efficient speed control of DC motors: imitation learning with fuzzy logic expert systems. *Automatika*, 66(2), 306–320.
16. Ozturk, N. & Celik, E. Speed control of permanent magnet synchronous motors using fuzzy controller based on genetic algorithms. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 43 (1), 889–898 (2012).
17. Manuel, N. L., Inanc, N. & Luy, M. Control and performance analyses of a DC motor using optimized PIDs and fuzzy logic

controller. *Results in Control and Optimization*, 13, p.100306. (2023).

18. Naung, Y., Anatolii, S. & Lin, Y. H. January. Speed control of DC motor by using neural network parameter tuner for PI-controller. In *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)* (pp. 2152–2156). IEEE. (2019).
19. Rodríguez-Molina, A., Villarreal-Cervantes, M. G. & Aldape-Pérez, M. An adaptive control study for the DC motor using meta-heuristic algorithms. *Soft. Comput.* 23, 889–906 (2019).