



Harmonic Analysis of Accelerometer Signals Using Cheetah Optimization Algorithm

Kadir Yasin Sunca^{1,a,*}, Serdar Koçkanat^{2,b}

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 54187 Serdivan/SAKARYA

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 58140 Merkez/SİVAS

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 04/07/2024

Accepted: 26/07/2024

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

In this study, harmonic analysis is performed with the help of Cheetah Optimization Algorithm to determine the estimation of the harmonic signal obtained from the shaking table used by civil and earthquake engineers to simulate earthquake-induced ground motion signals. The amplitude and phase values estimated as a result of harmonic analysis are compared and evaluated with the results of some algorithms in the literature. The error performance of the results obtained with the Cheetah Optimization Algorithm in the proposed approach is more successful than the results of the studies in the literature.

Keywords: Shaking Table, Amplitude and Phase, Harmonic, Cheetah Optimization Algorithm

Çita Optimizasyon Algoritması Kullanarak İvmeölçer Sinyallerinin Harmonik Analizi

Süreç

Geliş: 04/07/2024

Kabul: 26/07/2024

Öz

Bu çalışmada, inşaat ve deprem mühendislerinin deprem kaynaklı yer hareket sinyallerini simüle etmek için kullandıkları sarsma tablasından elde edilmiş harmonikli sinyalin kestirimi belirlemek için Çita Optimizasyon Algoritması yardımıyla harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Harmonik analizi sonucunda kestirilen genlik ve faz değerleri literatürdeki bazı algoritmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Önerilen yaklaşımda Çita Optimizasyon Algoritması ile elde edilen sonuçların hata performansı literatürdeki çalışmaların sonuçlarına göre daha başarılı çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sarsma Tablası, Genlik ve Faz, Harmonik, Çita Optimizasyon Algoritması

^a kadirsunca@subu.edu.tr

^{id} 0009-0006-5024-7820

^b skockanat@cumhuriyet.edu.tr

^{id} 0000-0001-6415-0241

How to Cite: Sunca KY, Koçkanat S (2024) Harmonic Analysis of Accelerometer Signals Using Cheetah Optimization Algorithm, Journal of Engineering Faculty, 2(2): 51-57

Giriş

Depremler, dünyanın oluşumundan bu yana sürekli olarak meydana gelen ve milyonlarca insanın hayatını etkileyen doğal felaketlerdir [1]. Geçmişte dünyada ve ülkemizde birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin analizleri gelecekteki riskleri anlamamız açısından büyük öneme sahiptir. Bu analizler içinde sarsma tablası, inşaat mühendisleri ve deprem mühendisleri için çok gerekli bir araç olmuştur [2].

Sarsma tablası, mekaniksel, elektriksel ve hidrolik tasarımıyla depremde olduğu gibi yapılara ve zeminlere laboratuvar ortamında yer hareketlerini uygulayabilmektedir [3]. Fakat sarsma tablası bazı fiziksel nedenlerden dolayı doğrusal olmayan bir sistem olarak kabul edilmektedir. Bu doğrusal olmayan sistemden dolayı sarsma tablasının çıkış sinyalinde harmonikler oluşmaktadır ve bu harmonikler sinyal analiz performansını düşürmektedir [4-5]. Bu harmonikleri kestirmek, dalganın gözlemlenmesini ve analizini kolaylaştırmak için birçok araştırmaya konu olmuştur.

Sarsma tablalarındaki ivme sinyallerinin harmoniklerini kestirmek için son yıllarda çok fazla tahmin yaklaşımı literatüre sunulmuştur. Harmoniklerin kestirimi için kullanılan en yaygın yöntem hızlı Fourier dönüşümü (FFT) yöntemidir [6]. Ancak, bu yöntemle dalgalarındaki harmonikler tam olarak kestirilemez.

Kalman filtresi yapılarını temel alan yaklaşımlar, ivme harmoniklerinin kestirimi için etkili çözümler sunmaktadır. Genişletilmiş Kalman filtresi, standart Kalman filtresi ve kokusuz Kalman filtresini beraber kullanılarak başarılı bir sonuç elde edilebilmektedir [7-9]. Ancak, bu yöntemlerin harmonik kestirimi, durum uzayı modeline doğrudan bağlıdır, bu da farklı ivme modelleri için tahmin doğruluğunun değişmesine neden olmaktadır.

Doğrusal olmayan harmonik kestirim problemlerinin üstesinden gelmek için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayalı yaklaşımlar önerilmiştir. Bu algoritmalar, doğrusal olmayan mühendislik problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar sunmuştur. Literatürde, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritmasına dayalı bir yaklaşımın kestirim sonuçlarının, sarsma tablası için daha önce hesaplanan ivme harmoniği kestirim sonuçlarından daha iyi olduğu ve LMS tabanlı yaklaşımlara göre daha başarılı bulunduğu gösterilmiştir. [10].

Harmonik kestirim problemlerinin çözümüne yönelik olarak önerilen Yarasa Algoritması (BA), Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması ve Modifiye Edilmiş Yapay Arı Kolonisi (MABC) ile En Küçük Kareler Yöntemi (RLS) algoritmalarının birleşimiyle elde edilen MABC-RLS algoritması, harmonik kestirim problemlerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar daha önce bildirilen PSO algoritması ile karşılaştırılmıştır. [11-13]. Kestirim sonuçları literatürde daha önceden sunulmuş değerlerden daha iyi sonuç vermiştir.

Bu makalenin ana hedef ve amaçları şu şekilde özetlenebilir;

- Çita Optimizasyon Algoritmasının güvenilirliğini ve başarısını kanıtlamak amacıyla, literatürde önerilen diğer algoritmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır.
- Araştırmacılar için, ivmeölçer verilerinin harmonik kestirimini gerçekleştirmek amacıyla hızlı ve doğru sonuç veren bir yazılım geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu makale, dört aşamadan oluşmaktadır. Bölüm 1’de, problemin özelliği ve problem çözümünde kullanılan literatürdeki benzer çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 2, makalenin temel odak noktası olan Çita Optimizasyon Algoritması hakkında kapsamlı bilgiler ve bu algoritmanın matematiksel modellemesini içermektedir. Bölüm 3’te, literatürdeki bir test sinyali önerilen Çita Optimizasyon Algoritması tabanlı yaklaşımla kestirilmiş, bu algoritmanın performansı daha önce literatürde analiz edilmiş algoritmalarla karşılaştırılarak başarıları değerlendirilmiştir. Son bölüm sonuç ve tartışma kısmından oluşmakta olup çalışmanın bulguları ve elde edilen sonuçlarını içermektedir.

Çita Optimizasyon Algoritması

Teknolojideki ilerlemeler, problemlerin çözümünü daha karmaşık hale getirmiş ve bu nedenle literatüre çok sayıda yeni optimizasyon algoritması eklenmiştir. Bu algoritmalar, belirli optimizasyon problemleri için başlangıç noktaları sağlamak ve güvenilir çözümler sunmaktadır. İdeal çözümler üretme potansiyeline sahip bu yöntemlerin başarılı olabilmesi için amaç fonksiyonunun ve kısıtların konveks olması gerekmektedir. Bu özellikler, algoritmaların daha hızlı ve doğru optimal çözümlere ulaşmasını sağlar. Ancak, deterministik algoritmaların yerel optimuma takılma eğilimi, bu yöntemlerin gerçek dünya problemlerini çözmeye karşılaştıkları temel zorluklardan biridir. Problem büyüdükçe bu kusur daha belirgin hale gelir ve bu durumu aşmak için birçok rastlantısal yaklaşım geliştirilmiştir [14].

Optimizasyon algoritmaları genellikle doğadaki hayvan davranışları, avlanma yöntemleri ve diğer doğal sistemlerden esinlenir. Bu makale, çitaların avlanma stratejilerinden esinlenen Çita Optimizasyon Algoritması üzerine odaklanmaktadır. Çitalar, genellikle Afrika ve İran bölgelerinde yaşayan ve saatte 120 km/s hıza ulaşabilen dünyanın en hızlı kara hayvanlarıdır [15]. Evrimsel adaptasyonları, çitaların bu inanılmaz hız ve esnekliğe sahip olmasını sağlamıştır. Uzun kuyrukları, hızlı manevralar yaparken dengelerini korumalarına yardımcı olurken, ince bacakları güçlü ve hızlı koşmalarına olanak sağlar. Hafif ve esnek omurgaları, hızlı hareketler sırasında vücutlarının esnekliğini artırır. Çitalar, gizlilik ve hızlarını birleştirerek avlarına yaklaşır ve kısa sürede avlarını yakalarlar. Ancak, yüksek hızlarını uzun süre koruyamamalarından dolayı, avlanma süreci genellikle bir dakikanın yarısından fazla sürmez. Bu nedenle, çitaların avlanma stratejileri hızlı ve etkili saldırılar gerektirir [16].

Çitalar genellikle ceylanlar, antiloplar, tavşanlar ve domuzları avlarlar. Avlarına yavaşça yaklaşarak en az mesafeye ulaşmaya çalışır, ardından gizlenip avın yaklaşmasını beklerler. Yeterince yaklaştıklarında hızla atağa geçerler. Çitalar, ön pençeleriyle avlarına hızlı ve güçlü darbeler indirerek avlarının dengesini bozar ve yere düşmelerini sağlar [17]. Güçlü pençeleriyle avlarını sıkıca tutarak kaçmalarını engeller ve avlarını etkisiz hale getirirler. Bu strateji, çitaların başarılı avlanmalarını ve avlarını güvenli bir şekilde yakalamalarını sağlar.

Çitaların avlanma aşamaları sırasıyla aşağıdaki gibidir;

- **1. Arama:** Çitalar, geniş alanları dikkatle tarayarak ve yüksek bölgelere çıkarak avlarını ararlar. Bu strateji, onlara geniş bir görüş alan sağlar ve potansiyel avlarını daha iyi tespit etmelerine olanak sağlar.
- **2. Oturup Bekleme:** Çitalar, avlarını tespit ettikten sonra dikkatlice bekleme konumuna geçer ve en ideal bölgeyi seçerler. Bu süreçte, avlarının hareketlerini analiz ederler ve fark edilmeden en yakın mesafeye yaklaşmayı hedeflerler.
- **3. Saldırı:** Çitalar, inanılmaz bir hız patlaması ile avlarına saldırarak hızlıca yaklaşırlar. Yeterince yaklaştıklarında, ön pençeleriyle güçlü bir darbe indirerek avlarının dengesini bozarlar.
- **4. Avı Bırakıp Eve Geri Dönme:** Eğer çitalar avlanmada başarısız olurlarsa, avlarını bırakıp geri dönerler. Bu başarısızlık devam ettiği taktirde, çitalar konum değiştirerek yeni bir av arayışına girerler.

Yukarıda açıklanan çitaların avlanma aşamaları Resim 1'de gösterilmiştir.

Arama Stratejisi

$X_{i,j}^{t+1}$ i Çitasının ($i = 1, 2, \dots, n$) j boyutundaki ($j = 1, 2, \dots, D$) mevcut boyutunu gösterebilir. Buradaki n popülasyonunun sayısını, D ise problemin boyutunu gösterir.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + r_{i,j}^{-1} \cdot a_{i,j}^t \quad (1)$$

Buradaki $X_{i,j}^{t+1}$ ve $X_{i,j}^t$ sırasıyla $t+1$ ve t zamanındaki i çitasının j boyutundaki mevcut konumunu ifade eder. t mevcut avlanma süresini ve T avlanma süresinin maksimum uzunluğunu ifade eder.

- $r_{i,j}^{-1}$: i çitasının j düzenlemesindeki rastgeleleştirme parametresidir.
- $a_{i,j}^t$: t zamanındaki i çitasının j düzenlemesindeki adım uzunluğudur.

Çitalar yavaş yürüyen avcılar oldukları için $a_{i,j}^t > 0$ ve $0.001 \times t / T$ olarak düzenlenebilir. Çitanın adım uzunlukları tamamen rastlantısal olduğu ve bu modelin bunu dikkate aldığı unutulmamalıdır. Arama stratejisi Resim 2.a' da gösterilmiştir.

Otur ve Bekle Stratejisi

Avlanma sırasında arama kısmında çita avı fark edebilir. Bu durumda çita çok dikkatli olmalıdır. Çünkü çitanın her hareketini av fark edebilir ve kaçmasına neden olabilir. Bu duruma engel olabilmek için çita avını yeterince yaklaştığını düşündüğünde pusuya yatar ve avın kendine yaklaşmasını bekler. Çitanın bu davranışı aşağıda belirtilmiştir;

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t \quad (2)$$

Bu strateji, Çita optimizasyon algoritmasının avlanma başarısı için tüm çitaların konumlarını aynı anda değiştirmemesini sağlar. Bu olay Resim 2.b' de gösterilmiştir.



(1)



(2)



(3)



(4)

Resim 1. Çitaların avlanma aşamaları
Figure 1. Hunting stages of cheetahs

Saldırı Stratejisi

Çitalar avına saldırmaya karar verdiklerinde son hızla avlarına doğru koşmaya başlarlar ve avları bir süre sonra çitanın yapmış olduğu saldırıyı fark eder ve kaçmaya başlar. Çita Resim 2.c' de gösterildiği gibi avını hızla takip etmeye devam eder. Çita avına yaklaştığında, Resim 2.d'de gösterildiği gibi, avın hayatta kalması için aniden yön değiştirmesi gerekmektedir. Bu durumda da çitanın konumu avının son konumuna yakın olması gerekmektedir.

Çitalar grup halinde avlanırken, her çita hem avın konumuna göre hem de gruptaki başka bir çitanın konumuna göre kendi pozisyonunu ayarlayabilir. Bu stratejiyle birbirleri ile koordinasyon içinde avlarını daha iyi bir şekilde yakalamalarını etkileyebilir. Çitaların saldırı strateji modeli aşağıda gösterilmiştir.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{B,j}^t + r_{i,j} \cdot \beta_{i,j}^t \quad (3)$$

Buradaki $X_{B,j}^t$ avın j boyutundaki konumudur. $r_{i,j}$ ve $\beta_{i,j}^t$ sırasıyla çita ait yönlendirme faktörü ve etkileşim faktörüdür. Yönlendirme faktörü, çitanın avın konumuna göre hızını ayarlamasını sağlar. Etkileşim faktörü ise, çita ve çevredeki diğer çitalar arasındaki etkileşimi yansıtır. Bu faktör, çitaların keskin dönüşlerini ve avlanma kısmındaki hareketlerini yansıtır.

Matematiksel Modelleme

Harmonik işaret $y(t)$;

$$y(t) = \sum_{n=1}^Q A_n \sin(2\pi n f_0 t + \varphi_n) + A_0 + n(t) \quad (4)$$

Buradaki f_0 : Temel frekans, A_n : n. harmoniğin genliği, φ_n : n. harmoniğin fazıdır. $y(t)$ istenilen T, örnekleme periyoduyla örneklenip $y(k)$ işaretine dönüşmektedir.

$$y(k) = \sum_{n=1}^Q A_n \sin(\omega_n k T_s + \varphi_n) + A_0 - A_0 \alpha_0 k T_s + n(k) \quad (5)$$

elde edilmektedir. Buradaki. A_0 : DC bileşeni, $n(t)$:Gürültü, Q : Harmonik sayısıdır. Önerilen model;

$$y(k) = x(k)w(k)$$

$$x(k) = [\sin(w_1 k T_s) \cos(w_1 k T_s) \dots \sin(w_n k T_s) \cos(w_n k T_s) 1 - k T_s]^T \quad (6)$$

$w = [A_1 \cos\phi_1 A_1 \sin\phi_1 \dots A_n \cos\phi_n A_n \sin\phi_n A_0 A_0 \alpha_0]^T$ formuna evrilmektedir. Algoritmanın harmonikleri kestirmek için amaç fonksiyonu

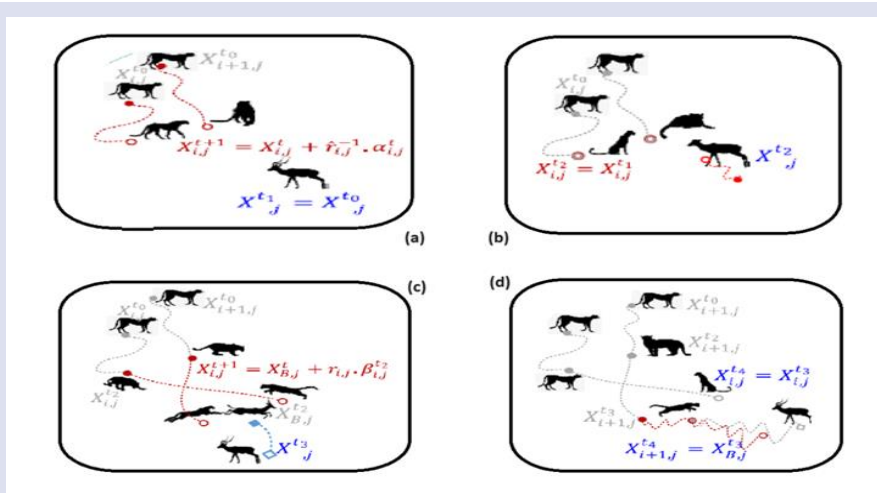
$$Amaç = \min \left(\sum_{k=1}^K e^2(k) \right) = MSE(y_k - y_{k_{kestirilen}}) \quad (7)$$

Analiz ve Sonuçlar

Bu çalışmada, 6 harmonik içeren ve frekansı 5 Hz olarak seçilen literatürdeki bir harmonik test işareti; $y(t) = 6 \sin(10\pi t + 0.25) + 5 \sin(20\pi t + 0.27) + 4 \sin(30\pi t + 0.29) + 3 \sin(40\pi t + 0.2) + 2 \sin(50\pi t + 0.3) + 1 \sin(60\pi t + 0.4)$ kullanılmaktadır [18].

Denklem 8'de verilen test sinyalinin genlik ve faz değerlerinin kestirimi için Çita Optimizasyon Algoritması kullanılmıştır. Çita Optimizasyon Algoritmasının sergilediği kestirim performansını değerlendirirken yine daha önce literatürdeki Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yarasa Algoritması (BA), Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ve Modifiye Edilmiş Yapay Arı Kolonisi (MABC-RLS) algoritması çalışmalarıyla sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çita optimizasyon algoritması kestirim probleminin çözümde 30 kez bağımsız olarak koşurulmuş ve elde edilen sonuçların ortalama, standart sapma, en iyi ve kötü değerleri ise Çizelge 1' de gösterilmiştir. Çizelge 2'de gerçek sinyalin genlik ve faz değerleri, literatürde daha önce verilen çalışmaların kestirim sonuçları ve hata değerleri ile birlikte önerilen CO tabanlı yaklaşımın sonuçları da gösterilmektedir.

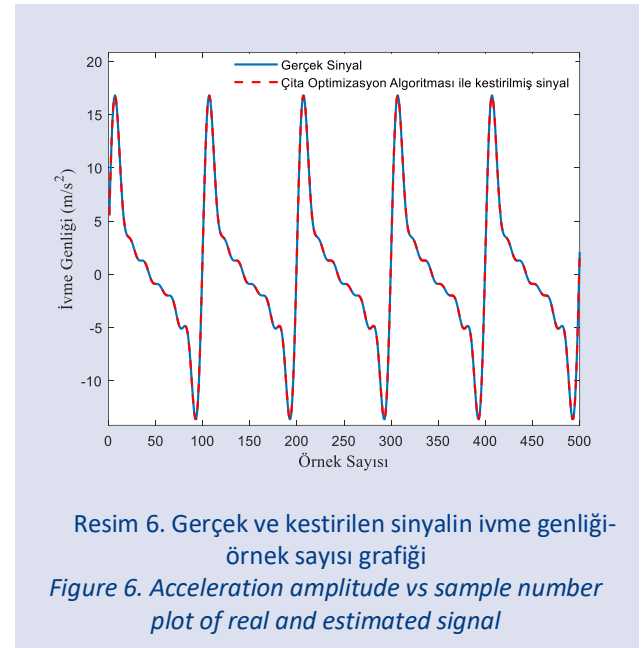
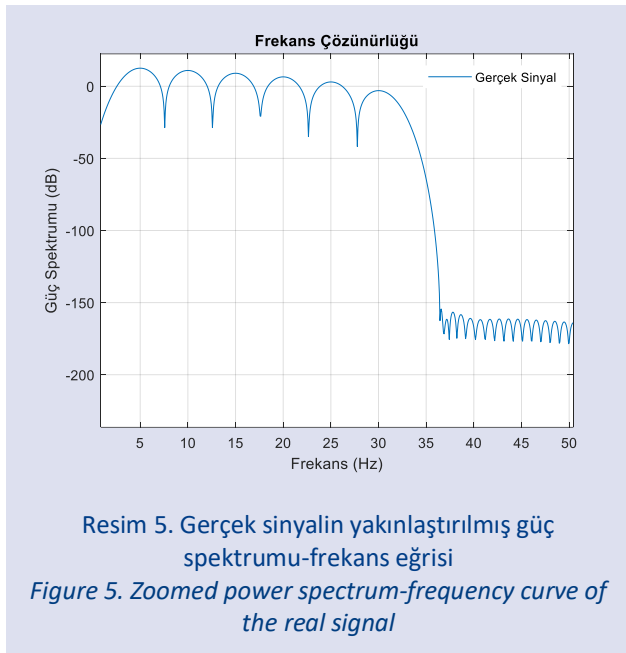
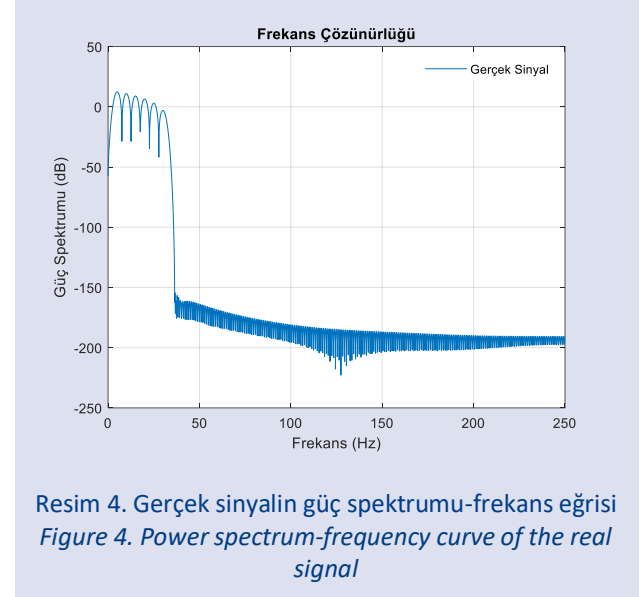
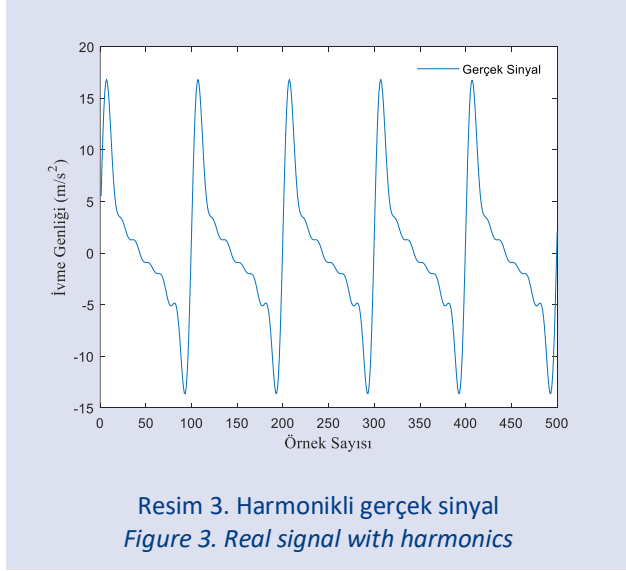
Genlik kısmında birinci harmonik derecesinde %0.0001, ikinci harmonik derecesinde %0.0001, üçüncü harmonik derecesinde %0.0002, dördüncü harmonik derecesinde %0.0001, beşinci harmonik derecesinde %0.0001 ve altıncı harmonik derecesinde %0.0004 hata oranları ile tüm harmonik derecelerinde diğer rakip algoritmalara göre daha iyi sonuç vermiştir. Faz kısmında ise üçüncü derece harmoniğinde %0.0010 ile rakip algoritmalara göre iyi sonuç vermiştir ve böylece toplam 12 parametrenin 7 parametresi ile diğer rakip algoritmalar karşısında başarı sağlamıştır.

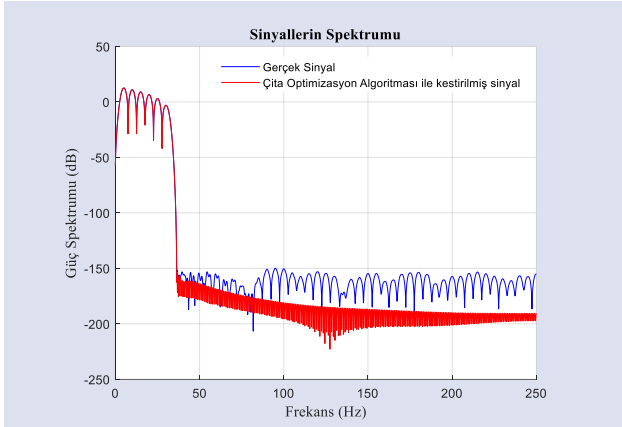


Resim 2. Çita optimizasyon algoritması modellemesi
Figure 2. Cheetah optimization algorithm modeling

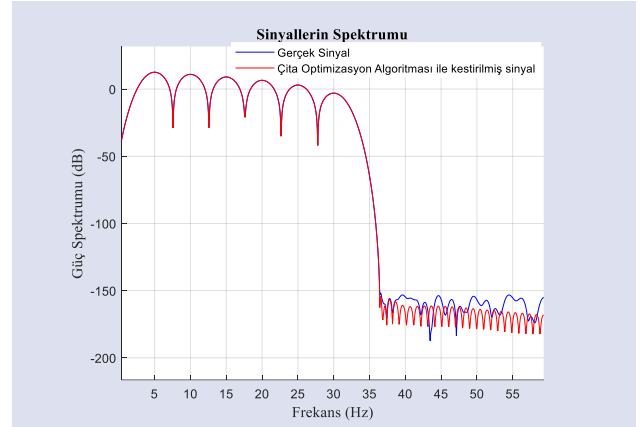
Resim 3'te harmonikli gerçek sinyal gösterilmiştir. Bu sinyalin Güç Spektrumu-Frekans eğrileri ise Resim 4'de ve sinyalin daha belirgin görülmesi adına sinyalin yakınlaştırılmış Güç Spektrumu-Frekans eğrileri ise Resim 5'de sunulmuştur. Bu şekillerde, gerçek sinyalin frekans domenindeki gücü gösterilmiştir. Güç spektrumu, bir sinyalin frekans bileşenlerinin gücünü dB cinsinden ifade etmektedir. Resim 6'da Çıta Optimizasyon Algoritması ile elde edilen gerçek ve kestirilen sinyalin

genlik-örnek sayısı eğrisi gösterilmiştir. İki işarete bakıldığında, aralarındaki örtüşme ve uyumun oldukça başarılı olduğu gösterilmektedir. Resim 7'de gerçek ve kestirilen sinyalin Güç Spektrumu-Frekans eğrileri ve Resim 8'de ise gerçek ve kestirilen sinyalin yakınlaştırılmış Güç Spektrumu-Frekans eğrileri sunulmuştur. Çıta Optimizasyon Algoritması ile elde edilen tahmini sinyalin frekans bileşenlerinin, gerçek sinyal ile ne kadar uyumlu olduğu bu şekillerde açıkça gösterilmiştir.





Resim 7. Gerçek ve kestirilen sinyalin Güç Spektrumu-frekans eğrileri
Figure 7. Power spectrum-frequency curves of real and estimated signal



Resim 8. Gerçek ve kestirilen sinyalin yakınlaştırılmış Güç Spektrumu-Frekans eğrileri
Figure 8. Zoomed Power Spectrum-Frequency curves of real and estimated signal

Çizelge 1. CO algoritmasının performans parametreleri

Table 1. Performance parameters of the CO algorithm

Ortalama	Standart Sapma	En İyi	En Kötü
1.0032	3.2745	1.3669	16.9013

Çizelge 2. Karşılaştırılan algoritmalar için kestirilen genlik ve faz değerleri ile birlikte hata değerleri

Table 2. Estimated amplitude and phase values and error values for the compared algorithms

Algoritmalar	Parametreler	Harmonik Dereceler					
		Birinci	İkinci	Üçüncü	Dördüncü	Beşinci	Altıncı
Gerçek	Frekans (Hz)	5	10	15	20	25	30
	Genlik (m/s ²)	6	5	4	3	2	1
	Faz(radyan)	0.25	0.27	0.29	0.2	0.3	0.4
PSO Algoritması	Genlik (m/s ²)	6.0001	4.9986	3.9999	3.0011	2.0007	0.9997
	Hata (%)	0.0017	0.0288	0.0027	0.0357	0.0365	0.0257
	Faz(radyan)	0.2499	0.2701	0.2901	0.1999	0.3000	0.4014
Yarasa (BA) Algoritması	Hata (%)	0.0282	0.0253	0.0430	0.0320	0.0033	0.3385
	Genlik (m/s ²)	6.0015	5.0006	4.0014	3.0010	2.0006	1.0009
	Hata (%)	0.0090	0.0054	0.0038	0.0109	0.0096	0.0218
ABC Algoritması	Faz(radyan)	0.2501	0.2700	0.2901	0.1999	0.3000	0.4010
	Hata (%)	0.0064	0.0090	0.0032	0.0056	0.0624	0.0244
	Genlik (m/s ²)	6.0005	4.9999	4.0001	3.0001	2.0004	1.0003
MABC-RLS Algoritması	Hata (%)	0.0084	0.0027	0.0020	0.0030	0.0182	0.0255
	Faz(radyan)	0.2500	0.2700	0.2900	0.2000	0.3000	0.4000
	Hata (%)	0.0011	0.0070	0.0050	0.0001	0.0024	0.0000
Çıta Algoritması	Genlik (m/s ²)	6.0001	5.0001	4.0001	2.9999	2.0000	1.0000
	Hata (%)	0.0012	0.0020	0.0015	0.0025	0.0002	0.0036
	Faz(radyan)	0.2500	0.2700	0.2900	0.2000	0.3000	0.4000
Çıta Algoritması	Hata (%)	0.0034	0.0010	0.0013	0.0072	0.0032	0.0074
	Genlik (m/s ²)	6.0000	5.0000	4.0000	3.0000	2.0000	1.0000
	Hata (%)	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004
Çıta Algoritması	Faz(radyan)	0.2500	0.2700	0.2900	0.2000	0.3000	0.4000
	Hata (%)	0.0039	0.0027	0.0007	0.0047	0.0073	0.0122

Sonuç

Bu çalışmada literatürde önerilen test sinyallerinin harmoniklerinin Çita Optimizasyon Algoritması ile analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda genlik kısmında birinci harmonik derecesinde %0.0001, ikinci harmonik derecesinde %0.0001, üçüncü harmonik derecesinde %0.0002, dördüncü harmonik derecesinde %0.0001, beşinci harmonik derecesinde %0.0001 ve altıncı harmonik derecesinde %0.0004 hata oranları ile tüm harmonik derecelerinde diğer rakip algoritmalarla göre daha iyi sonuç vermiştir. Faz kısmında ise üçüncü derece harmoniğinde %0.0010 ile rakip algoritmalarla göre iyi sonuç vermiştir ve böylece toplam 12 parametrenin 7 parametresi ile diğer rakip algoritmalar karşısında başarı sağlamıştır. İnşaat mühendisliği ve deprem mühendisliği gibi alanlarda deprem sarsıntılarını incelemeye yönelik alternatif ve başarılı bir yaklaşım sunmaktadır. Kullanılan algoritmanın bu alanlardaki harmoniklerin kestirim çalışmalarında kullanılabilirliği etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Kaynaklar

1. Keller, Edward A., and Duane E. DeVecchio. *Natural hazards: earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes*. Routledge, 2019.
2. X. Ji, K. Kajiwara, T. Nagae, R. Enokida, M. Nakashima, A substructure shaking table test for reproduction of earthquake responses of high-rise buildings, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 38 (12) (2009) 1381–1399, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.907>.
3. Prasad, Bharat Bhushan. *İleri zemin dinamiği ve deprem mühendisliği*. PHI Öğrenme Pvt. Ltd., 2011.
4. K. Seki, M. Iwasaki, M. Kawafuku, H. Hirai, K. Yasuda, Improvement of control performance in shaking-tables by feedback compensation for reaction force, in: *Proceedings of 2008 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Orlando, FL, 2008, pp. 2551–2556, <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2008.4758358>.
5. J.-J. Yao, S.-H. Hu, W. Fu, J.-W. Han, Impact of excitation signal upon the acceleration harmonic distortion of an electrohydraulic shaking table, *J. Vib. Control* 17 (7) (2011) 1106–1111, <http://dx.doi.org/10.1177/1077546310366579>.
6. Ingale, Rajesh. "Harmonic analysis using FFT and STFT." *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition* 7.4 (2014): 345-362.
7. J. Yao, H. Yan, R. Xiao, D. Di, G. Jiang, S. Gao, H. Yu, Sinusoidal acceleration harmonic estimation using the extended Kalman filter for an electrohydraulic servo shaking table, *J. Vib. Control* 21 (8) (2013) 1566–1579, <http://dx.doi.org/10.1177/1077546313499392>.
8. J. Yao, D. Di, G. Jiang, G. Shuang, H. Yan, Real-time acceleration harmonics estimation for an electro-hydraulic servo shaking table using Kalman filter with a linear model, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 22 (2) (2014) 794–800, <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2013.2256136>.
9. J. Yao, R. Xiao, S. Chen, D. Duato, G. Shuang, H. Yu, Acceleration harmonic identification algorithm based on the unscented Kalman filter for shaking signals of an electrohydraulic servo shaking table, *J. Vib. Control* 21 (16) (2014) 3205–3217, <http://dx.doi.org/10.1177/1077546314521849>.
10. J. Yao, H. Yu, M. Dietz, R. Xiao, S. Chen, T. Wang, Q. Niu, Acceleration harmonic estimation for a hydraulic shaking table by using particle swarm optimization, *Trans. Inst. Meas. Control* 39 (5) (2017) 738–747, <http://dx.doi.org/10.1177/0142331215619975>.
11. S. Kockanat, Acceleration harmonic estimation for hydraulic shaking table using bat algorithm, *Eur. J. Sci. Technol.* (15) (2019) 387–393, <http://dx.doi.org/10.31590/ejosat.536755>.
12. S. Kockanat, Acceleration harmonic estimation using an approach based artificial bee colony algorithm: A hydraulic shaking table application, in: *27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2019, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/SIU.2019.8806377>.
13. Kockanat, S. (2020). Acceleration harmonics estimation and elimination with MABC–RLS algorithm: Simulation and experimental analyses on shaking table. *Applied Soft Computing*, 92, 106377, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106377>.
14. Klein, Carlos Eduardo, Viviana Cocco Mariani, and Leandro dos Santos Coelho. "Cheetah Based Optimization Algorithm: A Novel Swarm Intelligence Paradigm." *ESANN*. 2018.
15. O'Brien, S. J., Johnson, W. E., Driscoll, C. A., Dobrynin, P. & Marker, L. Conservation genetics of the cheetah: lessons learned and new opportunities. *J. Hered.* 108, 671–677 (2017). <https://doi.org/10.1093/jhered/esx047>.
16. Krausman, P. R. & Morales, S. M. *Acinonyx jubatus*. *Mamm. Species* 2005, 1–6 (2005).
17. Estes, R. D. *The Behavior Guide to African Mammals: Including Hoofed Mammals, Carnivores* (Primates). University of California Press, 2012).
18. Yao, J., Yu, H., Dietz, M., Xiao, R., Chen, S., Wang, T. and Niu, Q. (2017). Acceleration harmonic estimation for a hydraulic shaking table by using particle swarm optimization. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 39(5), 738–747