

**Sensör ve Akıllı Telefon Kayıtları Yardımı ile Yapının Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi**Hidayet UYAR<sup>1</sup>, Elif AĞCAKOCA<sup>2\*</sup>

**ÖZET:** Çalışma kapsamında, sarsma tablasındaki çelik model yapıya yerleştirilen sensör ve akıllı telefondan elde edilen titreşim değerleri ile MATLAB matematiksel tahmin modeli kullanılarak oluşturulan titreşim değerleri arasındaki uyum oranları karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan çelik model yapı; tek açıklıklı, dört katlı çelik malzemesinden üretilmiştir. Çelik model yapıda bulunan kolon-kiriş bağlantıları rijit, model binanın dört tarafında bulunan temel bağlantıları sarsma tablasına ankastre olacak şekilde montelenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen titreşim değerleri, sarsma tablasının tabanına ve çelik model yapının tepe noktasına yerleştirilen sensör ve akıllı telefondan elde edilmiştir. Sarsma tablası El-Centro, Loma-Prieta, Kobe ve Sakarya depremlerinin titreşim değerleriyle zorlanmış ve oluşan zorlanmanın yapıda meydana getirdiği titreşimler sensör ve akıllı telefon yardımıyla kaydedilmiştir. Sarsma tablasının tabanında bulunan sensör ve akıllı telefon titreşim değerleri girdi, çelik model yapının tepe noktasında bulunan sensör ve akıllı telefonlar titreşim değerleri sisteme çıktı olarak tanımlanmıştır. Çalışmaların sonucunda deneysel olarak elde edilen girdi-çıkı verileri arasındaki uyumluluk oranları, Matlab programındaki otoregresif ARX ve otoregresif hareketli ortalamalar ARMAX modelinde bulunan tahmin-öngörü ile üretilen girdi-çıkı arasındaki uyumluluk oranları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sarsma tablası, ARX model, ARMAX model, akıllı telefon

**Determination of Dynamic Characteristics of the Structure with Sensor and Intelligent Telephone Records**

**ABSTRACT:** In this study, the vibration ratios obtained from the sensor and smartphone placed in the steel model structure in the vibration table and the vibration ratios generated using the MATLAB mathematical prediction model were compared. The steel model structure used in the experimental study; made of single-span, four-ply steel. Column-beam connections in the steel model structure are rigid and the base connections on all four sides of the model building are mounted to the vibration table. The vibration values obtained from the experimental study were obtained from the sensor and the smartphone placed at the base of the vibration table and at the top of the steel model structure. The vibration table was forced with the vibration values of El-Centro, Loma-Prieta, Kobe and Sakarya earthquakes and the vibrations caused by the strain caused by the structure were recorded with the help of sensor and smart phone. Sensor and smartphone vibration values at the base of the shaking table are defined as input, sensor and smartphone vibration values at the top of the steel model structure are defined as output to the system. As a result of the studies, the compatibility ratios between the input-output data obtained experimentally, the autoregressive ARX in the Matlab program and the autoregressive moving averages were compared between the prediction-prediction found in the ARMAX model and the input-output produced. In addition, the difference between sensor and smartphone acceleration data was investigated and which of the methods used gave better results.

**Keywords:** Shaking table, ARX models, ARMAX models, smartphone.

<sup>1</sup> Hidayet UYAR (Orcid ID: 0000 0002 8514 3398), Elif AĞCAKOCA (Orcid ID: 0000 0001 8228 0592)

<sup>1,2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Elif Ağcakoca, e-mail: elifd@sakarya.edu.tr

## GİRİŞ

Günümüzde çelik malzemesi, yüksek dayanıma sahip olması ve kolay inşa edilmesinden dolayı, özellikle yüksek katlı yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıların tasarlanan yükten daha fazla yüke maruz kalması ya da ani deprem kuvvetleri ile karşılaşmaları, yapılarda hasar oluşmasına hatta göçmesine neden olmaktadır. Göçme sonucu oluşan can ve mal kayıplarını en aza indirmek için, yapının tasarım aşamasında maruz kalacağı yükleme risklerini değerlendirip, gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Çelik malzemesinin süneklik düzeyinin yüksek olması, ani veya tasarlanmayan yüklerden oluşan hasarları azaltmakta böylece yapıda oluşacak ani göçmeyi engellemektedir. Ülkemizde inşa edilecek yapılarda uyulması gereken kural ve yöntemler, deneysel ve teorik çalışmalar yardımıyla 2018 yılında güncellenen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde belirtilmektedir.

Taşıyıcı sistemi ister betonarme, ister çelik, ister kompozit olsun, yapıların dinamik davranışının belirlenmesinde birçok teorik yöntem bulunmaktadır. Ancak teorik yöntemlerde, kullanılan yapı sistemlerinin sınır şartlarının belirsizliği, malzeme davranışının tam anlamıyla modellenmemesi ve deprem hareketinin zamana bağlı oluşturduğu karmaşıklık, deneysel çalışmaların yapılmasını da zorunlu hale getirmiştir.

Yapılan bu çalışmada kullanılan yöntem; sarsma tablası üzerinde oluşturulmuş model çelik yapıya uygulanan zorlanmış titreşim sonucu, sensör ve akıllı telefonda elde edilen titreşim değerleri, otoregresif ARX ve otoregresif hareketli ortalamalar ARMAX tahmin modeli kullanılarak elde edilmiş sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada matematiksel olarak oluşturulan modelin içinde bulunan sınır değerlere dikkat edilerek, girdi çıktı ivme verileri arasındaki uyum oranları belirlenmiştir. Kullanılan Otoregresif ortalamalar modelleri ARX ve ARMAX, istatistikte Box-Jenkins modellerinde kullanılan ‘zaman serisi öngörme’ yöntemi olarak bilinmektedir. Zaman serisi öngörme yöntemi, zaman aralıkları eşit olan verilerin oluşturduğu seri sistemlerinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemde,  $X_t$  gibi bir zaman seri verisine sahip ARX veya ARMAX modelinde oluşan algoritma, serinin sonraki adımlarında ortaya çıkan değerleri anlamak ve öngörmek için kullanılmaktadır. ARMAX modelinin ilk aşaması otoregresif kısım (AR), ikinci aşaması ise hareketli ortalamalar kısmı olan (MAX)’dan oluşturulmaktadır.

Sarsma tablası deneyleri, yapının deprem sırasındaki davranışını en iyi yansıtan yöntem olarak kabul edilmektedir. Ancak sarsma tablasının kapasitesinin sınırlı olması, yapının boyutlarını sınırladığı için en büyük dezavantajdır. Bu yüzden yapıyı uygun ölçek ile küçülterek sarsma tablası yardımıyla yapı davranışının belirlenmesi en doğru yaklaşım olmaktadır. Ayrıca sarsma tablası deneyleri, dinamik hareketlerin yapı üzerindeki etkisinin detaylı olarak incelenmesini sağladığından literatürde bu konuyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Kocaeli depremi sonrasında ciddi hasar alan Fatih Cami’nden çevresel titreşimler alınmış, spektral analizler ve parametrik analizler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, spektral analizlerde geniş modal frekanslar bulunurken, parametrik analizlerden elde edilen durum uzay modellerini kullanarak, mod şekilleri ve frekans değerleri bulunmuştur (Beyen, 2007). Yapılan başka bir çalışmada kullanılan sarsma tablası, modellenen yapıyı gerçek veya yapay yer hareketleri etkisi altında oluşan zorlanmaları ölçmek için kullanmıştır. Çalışmalarda kullanılan sarsma tablaları farklı serbestlik derecelerine ve farklı çalışma prensibine sahip olabilmekte, ayrıca hidrolik veya daha farklı tahrik sistemleri yardımı ile çalıştırılabilmektedir (Mahdavi, 2014). Sarsma tablalarının bu özellikleri sayesinde, yapı ya da yapı elemanları üzerine birebir veya rastgele deprem verilerini uygulanabilmekte ve yapıda meydana gelen sonuçlar gözlemlenebilmektedir. Literatürde sarsma tablası kullanılarak, laboratuvar ortamında oluşturulmuş üç açıklıklı köprü modeline dereceli olarak hasarlar verilmiş, sarsma sonucu hasarlı yapıdan elde edilen ivme

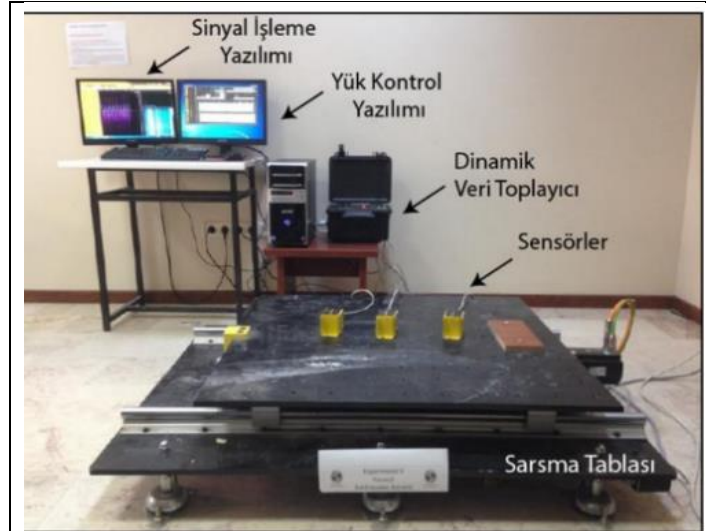
değerlerinin fiziksel ve kavramsal açıdan anlamlı olduğu görülmüştür (Catbas ve ark., 2008). Başka bir çalışmada ise, laboratuvar ortamında hasar almamış üç katlı çelik yapı modelin doğal frekansı ve mod şekli belirlenmişlerdir. Daha sonra çelik modelin bazı kolonlarına hasar verilerek, hasarlı yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, hasarlı ve hasarsız köprü modellerin dinamik karakteristikleri arasındaki fark incelenmişlerdir (Durgun ve ark., 2013). Sarsma tablası kullanarak tek katlı iki açıklıklı betonarme yapıya uygulanan sismik hareketin, yapıda oluşturduğu dinamik davranış belirlenmiştir (Bayhan ve ark., 2013). Yine başka bir çalışmada, sarsma tablası üzerinde bulunan model yapının kat rijitliklerinde değişiklik yapılmış, yapılan değişikliğin yapının dinamik davranışına olan etkisi incelenmiştir (Özçelik ve ark., 2013). Literatürde deneysel olarak yapılan çalışmada, farklı periyotlara sahip yapıların, sarsma tablası yardımıyla zorlanması sonucu elemanlarda oluşan yük-deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneysel çalışma yapılırken, görüntü işleme tekniği yardımıyla, yapı modelinin ve sarsma tablasının yerdeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen deneysel değerler ile teorik değerler karşılaştırılmıştır (Türker ve ark., 2011). Ayrıca literatürde akıllı telefonlar kullanılarak yapılan çalışmalarda yapı sağlığı takibi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, çelik çerçeve sistemi oluşturulmuştur ve deneylerde mobil yapı sağlığı fizibilitesini doğrulamak adına kablo kuvvet testi ve mukayese testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda sensörden alınan ivme değerleri ile akıllı telefonlardan alınan ivme değerleri örtüştüğü görülmüştür. Çalışmanın sonucunda, yapı sağlığı izleme sistemi olarak akıllı telefon kullanılabileceği görülmüştür (Yu ve ark., 2015). Ayrıca literatürde 'Ishake' programı kullanılan 30 akıllı telefon sarsma tablasına monte edilmiş, elde edilen ivme değerleri ile programın işlevselliği araştırılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda, akıllı telefonlara yüklenen programlar yardımıyla ivme değerlerinin alınabileceği görülmüştür (Mari ve ark., 2011). Yapılan başka bir çalışmada ise deprem odağından 10 km ya da daha az uzaklıkta bulunan akıllı telefonlardan, büyüklüğü 5 ve üstü olan depremleri kayıt ettiği, edilen kayıtların içinde bulunan günlük hareket ya da gürültülerin deprem hareketlerinden ayırt edilebileceği görülmüştür (Kong ve ark., 2016).

Bu çalışma sayesinde, mevcut yapılarda deprem sonrası ya da farklı yükleme sonucu oluşan yapısal değişikliklerin oluşturduğu dinamik karakteristikler, herhangi bir analiz programı kullanmadan sadece yapıya yerleştirilen ivme ölçerlerden elde edilen veriler yardımıyla, AR-ARMA tahmin metodunu kullanarak belirlenebilmektedir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, birçok alanda kullanılan AR ve ARMA matematiksel tahmin modeli, yapı dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan sarsma tablası 1x1 m boyutunda, 125 kg'lık yük kapasitesine sahip olup Şekil 1'de gösterilmiştir. Sarsma tablası, toplam hareket boyu  $\pm 92.5$  mm, maksimum 2500 N yatay kuvvet kapasitesi, 2g maksimum ivme kapasitesi ve maksimum 500 mm/s doğrusal hıza sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Deneyler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan 1x1m boyutundaki tek eksenli sarsma tablası-deprem simülasyon cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada yük kontrol yazılımı vasıtasıyla sarsma tablasına El-Centro, Loma-Prieta, Kobe, Sakarya deprem kayıtları zorlanmış titreşim olarak uygulanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği.

Deney düzeneği sarsma tablası, sensörler ve dinamik veri toplayıcı cihazı ile verileri işleyen çevre birimlerinden oluşmaktadır. Bilgisayarda bulunan sinyal işleme yazılımı ile mevcut gerçek deprem kayıtları sarsma tablasına iletilmektedir. 250N servo-elektro motor kapasiteli sarsma tablası, tek eksenli olarak, gerçek deprem kayıtlarının yanı sıra sinüs, üçgen vb. tanımlı dalgaları simule edebilme özelliğine sahiptir. Servo motor ile hareketi sağlanan sarsma tablası maksimum  $\pm 2g$  ivme kapasitesine sahip deprem hareketleri yapıya üretebilmektedir. Deneyde kullanılan ivme ölçerler  $\pm 3g$  ölçüm kapasitesinde 0-400Hz frekans aralığına sahiptir.



Şekil 2. Sarsma tablasına yerleştirilmiş ivme ölçer ve akıllı telefon.

Deneyde kullanılan dört katlı çelik model yapı sarsma tablası üzerinde inşa edilmiştir. Kolonların toplam ağırlığı 3.76 kg döşemelerin toplam ağırlığı ise 40.76 kg olacak şekilde oluşturulmuştur. Kolon uzunlukları 1200mm, boyutu 50x2mm, döşeme 360x360mm boyutunda ve 10mm kalınlığındadır. Sarsma tablasının tabanına ve çelik model yapının en üst katına sensör ve akıllı telefon yerleştirilmiş, sensör ve akıllı telefonda Matlab programı için kullanılan girdi ve çıktı ivme verileri alınmıştır (Şekil 2).

### Sayısal Hesaplama Programı (Matlab)

Yapı, deprem veya farklı bir yükleme etkisine maruz kaldığında, yapıda oluşan hasar tespitinin kısa sürede yapılması oldukça zor olmaktadır. Yapıdan gerekli numunelerin gerekli şartlar altında

alınması, numunelerin mekanik özelliklerinin öğrenilmesi için deneylerinin yapılması, yapının hasarlarının tespiti için zaman ve maliyete neden olmaktadır. Ancak yapının dinamik özelliklerini veren yapı titreşimleri sayesinde çok kısa sürede ek maliyet ve zamana gerek duymadan kullanılan kayıt cihazları sayesinde yapı karakteristikleri belirlenebilmektedir. Kayıt cihazı olarak kullanılan sensör veya akıllı telefonda alınan titreşimler sayesinde yapıda oluşan hasar seviyesi tanımlanabilmektedir (Das ve ark., 2016).

Matlab programındaki Sistem Tanılama (System Identification Toolbox) araç kutusu, Simulink blokları yardımıyla ölçülen giriş-çıkış verisinden faydalanarak, dinamik sistemlerin matematiksel modellerini oluşturmak için yazılmış bir uygulamadır. Bu tür uygulamalar, yapıların herhangi bir yüke maruz kaldıktan sonra, yapının bu etkilere karşı oluşturduğu tepkileri tahmin etmemize yardımcı olmaktadır. Uygulamada sürekli-zaman, ayrık-zaman, süreç modellerini ve durum-uzay modellerini tanımlamak için zaman-alan ve frekans-alan giriş-çıkış verisini kullanılabilir. Ayrıca Matlab yazılımının içinde bulunan sistem tanılama, gizli çevrimiçi parametre tahmini için algoritmalar, maksimum olabilirlik, kestirme-hata minimizasyonu (PEM) ve alt-uzay sistemi tanımlama gibi teknikleri içermektedir. Ayrıca sistem tanılama araç kutusu, zaman serileri için veri modelleme tahmininin yapılmasını sağlamaktadır (Wittich ve ark., 2018).

Matlab içinde yazılmış ARX ve ARMAX tahmin modelinin oluşturduğu algoritmanın doğru sonuçlar verebilmesi için, girdi ve çıktı değerleri arasında uyum olması gerekmektedir. Uyum oranının yüksek çıkması, yapı için yazılmış algoritmanın sahip olduğu polinom derecesi ile doğrudan ilgilidir. Polinomun derecesi kullanıcı tarafından atılabilmekte ve artan polinom derecesi ile uyum oranında artış veya azalma oluşabilmektedir. Ancak Matlab kendi içinde girdi-çıkışlar arasında bulunan algoritmayı farklı testler ile kontrol etmekte ve sınır değerler koymaktadır. Dolayısı ile algoritmanın sahip olduğu polinom derecesini artırarak elde ettiğimiz denklemler sonsuz sayıda olmamaktadır. Elde edilen denklemin beyazlık ve bağımsızlık olarak isimlendirilen kontrol testlerini geçmesi aynı zamanda sınır değerler arasında kalması gerekmektedir.

Çalışmada, çelik model yapının dinamik karakteristiklerine, sensör veya akıllı telefonda elde edilen girdi verilerinin Matlab'da bulunan otoregresif ARX ve otoregresif hareketli ortalamalar ARMAX modeli kullanılarak elde edilmesi sağlanmıştır. Böylece, yüksek katlı binalar, su kulesi gibi özel yapılara, sensörler ya da akıllı telefonlar yerleştirilerek, yapının kullanım ömrü boyunca karşılaştığı yüklerin yapıda oluşturduğu etkiler tespit edilebilmektedir. Yapının, zamanla oluşan yüklenme etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi, yapı sağlığı izlemesi olarak isimlendirilmektedir (Ulusoy ve ark., 2010). Özellikle son yıllarda bu tür çalışmalar literatürde çok fazla yer almaktadır. Doğal tehlikelere maruz yapıların sensör ya da akıllı telefon yardımı ile yapı bütünlüğünün değerlendirilmesi ya da hasar tespitlerinin yapılmasında kullanılabilir. Sensör ya da akıllı telefon kullanılarak elde edilen titreşim verileri sayesinde, hasar tespitinde bulunabilmektedir (Doebing ve ark., 1996, Fassois ve Sakellariou, 2007).

Deneyel çalışmada, sarsma tablasının üzerine yerleştirilen sensörden elde edilen ivme değerleri (girdi) ve model yapının üzerine yerleştirilen sensörden elde edilen ivme değerleri (çıkış) verisi olarak toplanmaktadır. Çalışmada girdi-çıkış değerlerini, sarsma tablasının tabanına ve model yapının en üst katına yerleştirilen sensör ve akıllı telefonda bulunan hassas algılayıcılar sayesinde ivme değerleri alınmaktadır.

Çalışmada sarsma tablasının tabanına ve model yapının en üst katına yerleştirilen sensör ve akıllı telefonda alınan girdi-çıkış ham verileri, Sismosignal programında bulunan FFT (Fast Fourier Transform) yardımı ile filtrelenerek incelenmiştir.

Matlab Sistem Tanılama içinde bulunan Otoregresif (ARX) ve otoregresif hareketli ortalamalar (ARMAX) modelleri, ayrık zamanlı modeller olarak ifade edilmektedir. Karmaşık sistemlerin analizinde ayrık zamanlı modeller sonlu boyutlu sistemleri oluşturmaktadır bu durum sonsuz boyutlu sistemlere pratik yaklaşım olanağı sunmaktadır. Bir model oluşturulurken, modal parametrelerin belirlenmesi basit özdeğer olarak ifade edilmektedir. Çalışmada özdeğer olarak ARX ve ARMAX model türü seçilmiştir. Yapının doğal karakteristiklerinin tanımlanmasında sensör sayısını azaltmak için ARX veya ARMAX algoritması üretilebilmektedir. ARX modelindeki AR(p) ifadesi p. dereceden otoregresif bir modeli tanımlamaktadır. AR(p) modeli Eşitlik 1'de gösterilmiştir. AR model yapısı, son çıktı değerinin bir önceki değere bağlı olduğu modeldir. Bu model en küçük kareler integrasyonunun çerçevesinde model üretmektedir.

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \theta_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (1)$$

ARMA modelinde bulunan, MA(q) ifadesi, q. dereceden bir hareketli ortalamalar modelini Eşitlik 2'de gösterilmiştir.

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (2)$$

$\theta_1, \dots, \theta_q$  modelin parametreleridir  $\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots$  modelin hata terimleri olmaktadır. Bundan anlaşılmaktadır ki "hareketli ortalamalar" modelinde belirli bir zaman noktasındaki bir zaman serisi değişkeninin değeri (yani t'de  $X_t$  değeri) q tane daha önceki her bir zaman noktasında yapılan hataların (yani her t zaman noktası için i gecikmeli  $\varepsilon_{t-i}$  hatasının ağırlıklı olarak bileştirilmesi ile açıklanmaktadır. AR ve MA'nın birleştirilmesi ile oluşturulan ARMA modeli, AR(p) ve MA(q) modellerinin bir birleşimidir ve Eşitlik 3'de gösterilmiştir.

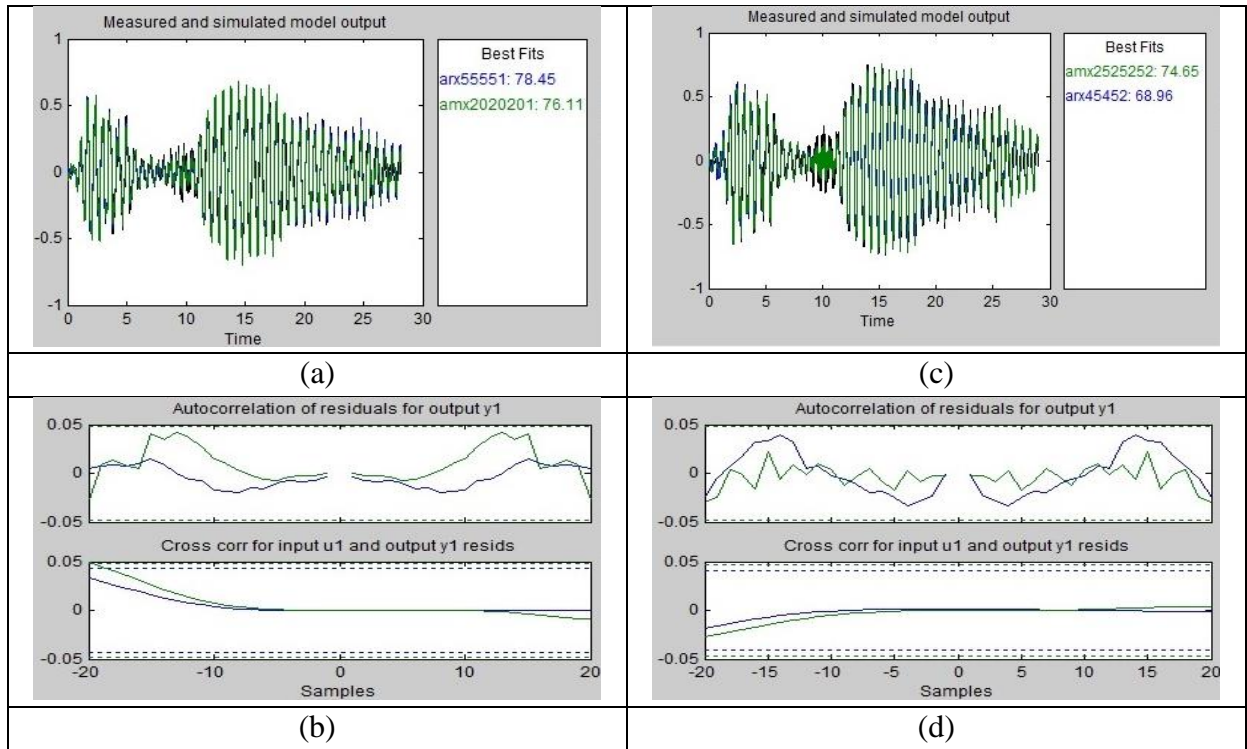
$$X_t = \varepsilon_t \sum_{i=1}^p \phi_i x_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (3)[14]$$

Çalışmada sarsma tablasına tanımlanan verilerin girdi-çıkıtı uyum oranları kontrol edilerek MATLAB programının Sistem Tanılama bölümünde bulunan ARX ve ARMAX modelleri yardımı yapı algoritması oluşturulmuştur. Matlab programına verilen girdi-çıkıtı değerleri, program içinde ARX ve ARMAX modelleri kurularak, tekrar oluşturulmaktadır.

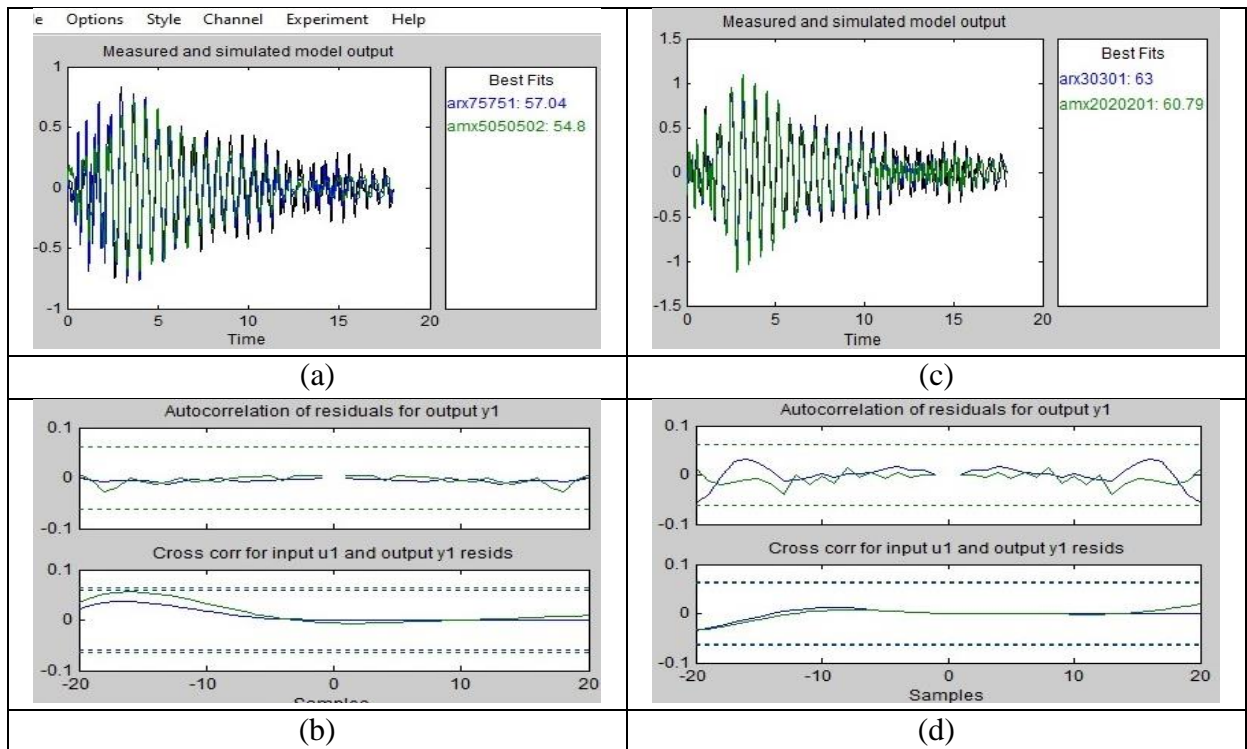
Kurulan matematiksel modelde bulunan polinom katsayıları(n) artırılarak, modelin maksimum uyum oranlarının elde edilmesine çalışılmıştır. Oluşturulan polinomdaki katsayısının(n) artması uyum oranını artırmaktadır. Ancak polinom katsayısının artması tek başına değerlendirilememekte girdi-çıkıtı değerleri arasında oluşan kalıntı değerlerinin oluşturduğu beyazlık ve bağımsızlık testinin belirlenen sınırlar içinde kalmasını gerektirmektedir.

Çalışmada, deneyi yapılan tek açıklıklı dört katlı çelik model binada sensör, akıllı telefon kullanarak alınan zorlanmış titreşim verilerin, ARX ve ARMAX tahmin modeli kullanılarak uyum oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmadan net bir sonuç elde etmek için daha önceki çalışmalarda sık olarak kullanılan, dört ayrı deprem kaydı kullanılmıştır. Her deprem kaydı için ayrı ayrı, beyazlık ve bağımsızlık testlerini geçen polinom derecesi belirlenmiştir. Belirlenen polinom derecesine göre uyum oranları kontrol edilmiştir. El-Centro depreminin uyum oranı, beyazlık ve bağımsızlık testi değerleri

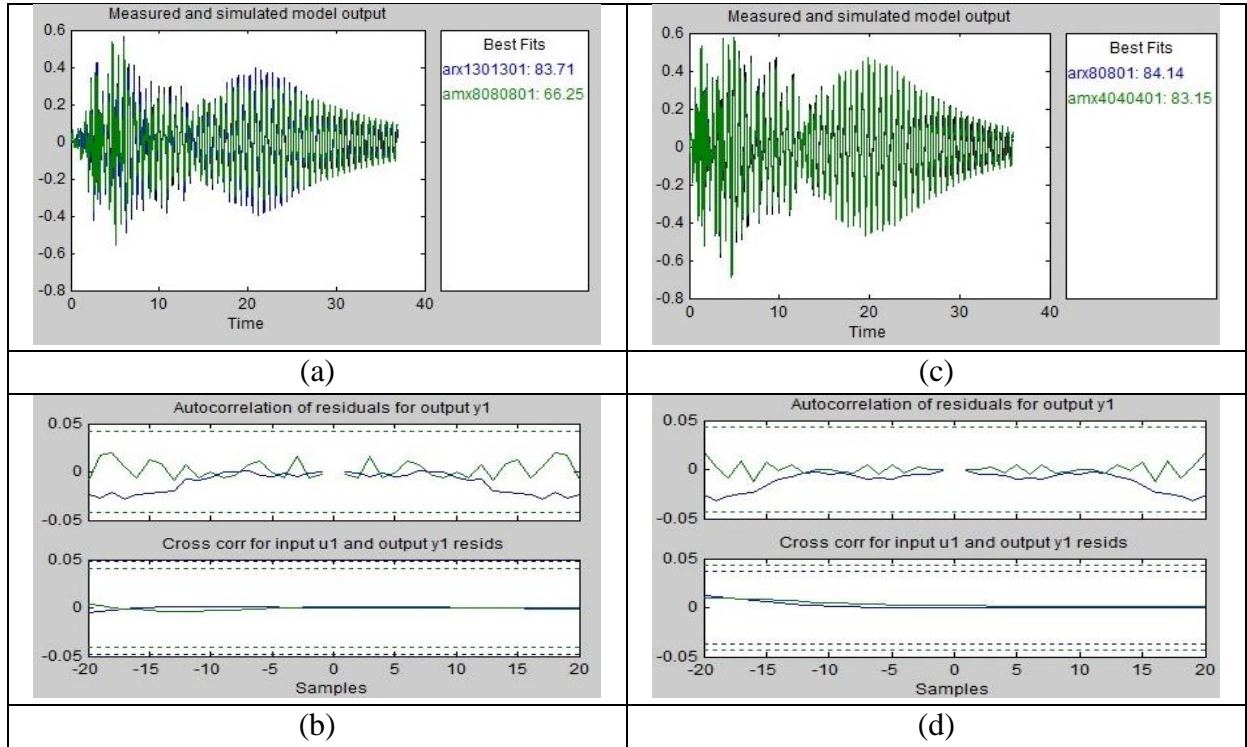
sensör ve akıllı telefon için Şekil 3’de verilmiştir. Loma Prieta depreminin uyum oranı, beyazlık, bağımsızlık testi değerleri sensör ve akıllı telefon için Şekil 4’de verilmiştir.



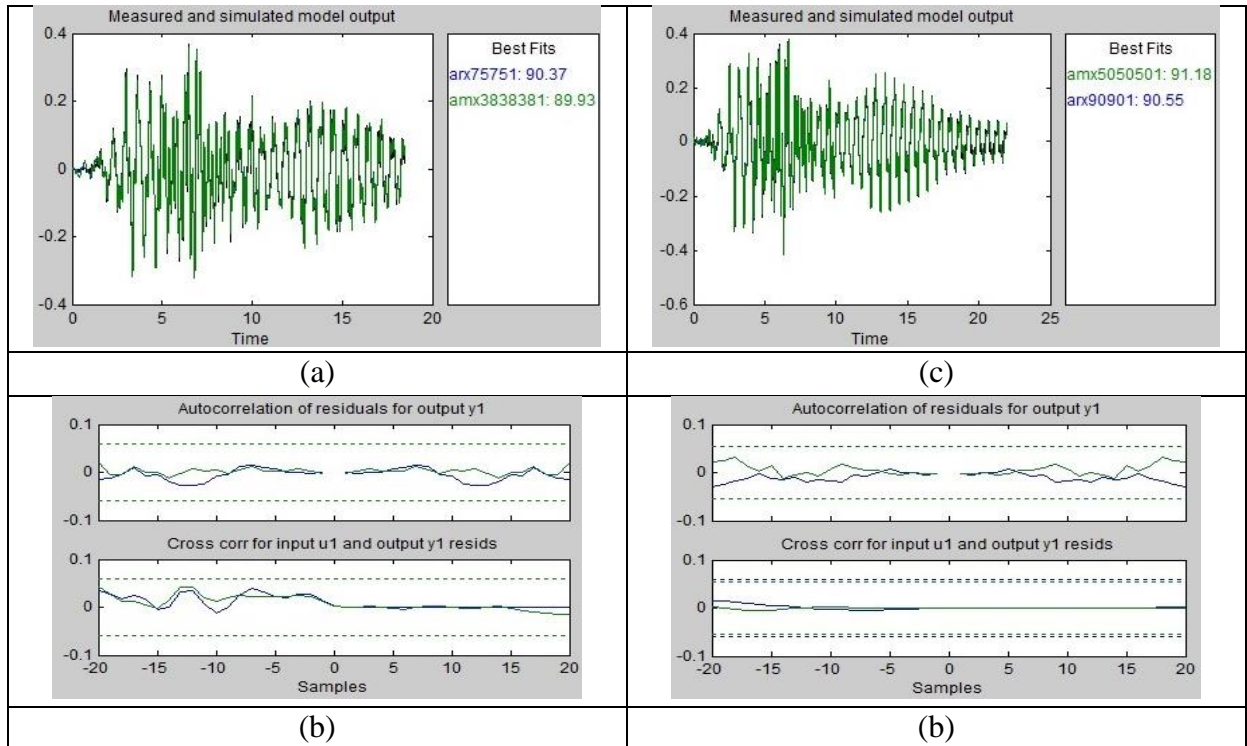
Şekil 3. El Centro depremi sensör girdi-çıkışı senkronizasyonu (a) ve uyum oranı (b), akıllı telefon girdi-çıkışı senkronizasyonu (c) ve uyum oranı (d).



Şekil 4. Loma Prieta depremi sensör girdi-çıkışı senkronizasyonu (a) ve uyum oranı (b), akıllı telefon girdi-çıkışı senkronizasyonu (c) ve uyum oranı (d).



Şekil 5. Kobe depremi sensör girdi-çıkı senkronizasyonu (a) ve uyum oranı (b), akıllı telefon girdi-çıkı senkronizasyonu (c) ve uyum oranı (d).

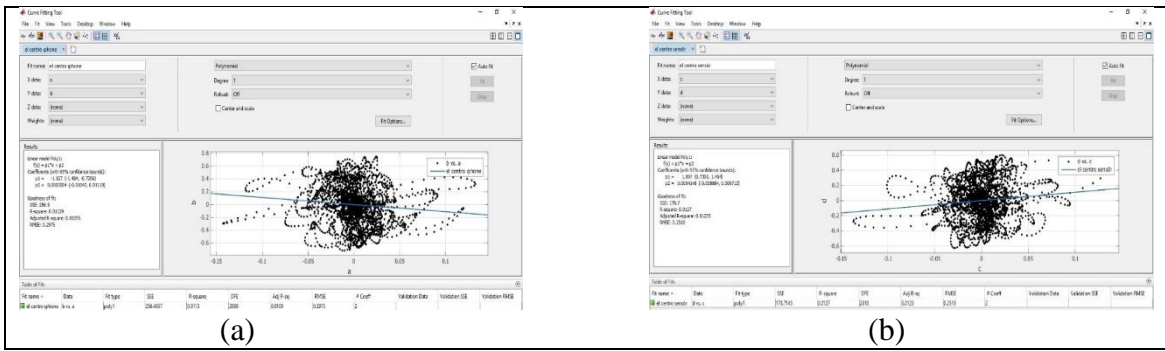


Şekil 6. Sakarya depremi sensör girdi-çıkı senkronizasyonu (a) ve uyum oranı (b), akıllı telefon girdi-çıkı senkronizasyonu (c) ve uyum oranı (d).

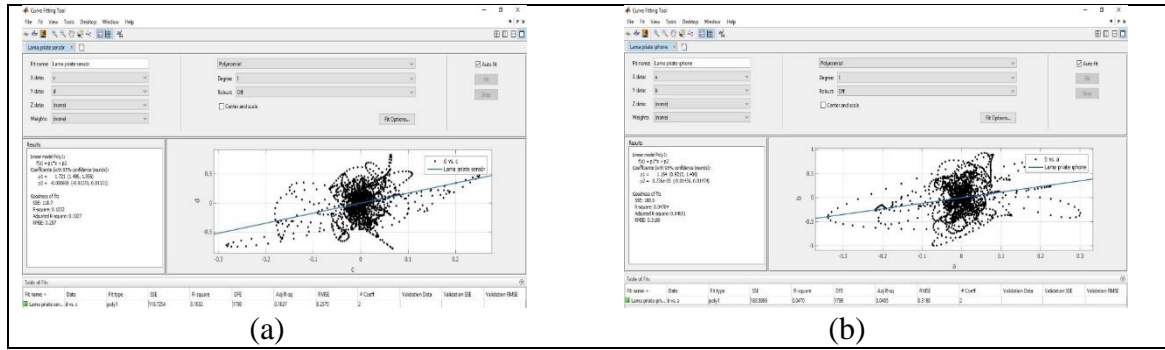
Kobe depreminin uyum oranı, beyazlık ve bağımsızlık testi değerleri sensör ve akıllı telefon için Şekil 5’de verilmiştir. Sakarya depreminin uyum oranı, beyazlık, bağımsızlık testi değerleri sensör ve akıllı telefon için Şekil 6’da verilmiştir.



Matlab programı çıktı verilerini oluştururken, matematiksel tahmin ve öngörü kullanmaktadır. ARX ve ARMAX modelleri, kendi öngördüğü ya da tahmin ettiği veri ile deney verisi arasındaki farkı kendi içinde kalıntı olarak ifade etmektedir. Kalıntı değerlerinin çok büyük değerler olmaması gerekmektedir ve bu kalıntı değerleri uyumsuzluk olarak ifade edilmektedir. Ayrıca Matlab girdi-kalıntı arasındaki çapraz korelasyon olup olmadığını kontrol edilerek, sonuçların güvenli bölgede kalıp kalmadığı, beyazlık ve bağımsızlık testlerini geçip geçmediği kontrol edilmiştir. Beyazlık testi; girdi-kalıntı ilişkisinin olmadığını, öngörünün belli bir güven aralığında kaldığını göstermektedir. Bağımsızlık testi ise; girdi-çıkıtlı verilerinin kalıntı ile bağlantısı olup olmadığını kontrol etmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6'de oluşturulan modellerde grafiğin kesikli çizgilerle gösterilen alan içinde kalması; girdi-kalıntı arasında korelasyon olmadığını göstermektedir. Bu durum çalışmada Matlab programının algoritmasının içinde bulunan polinom derecesinin doğruluğunu göstermektedir.

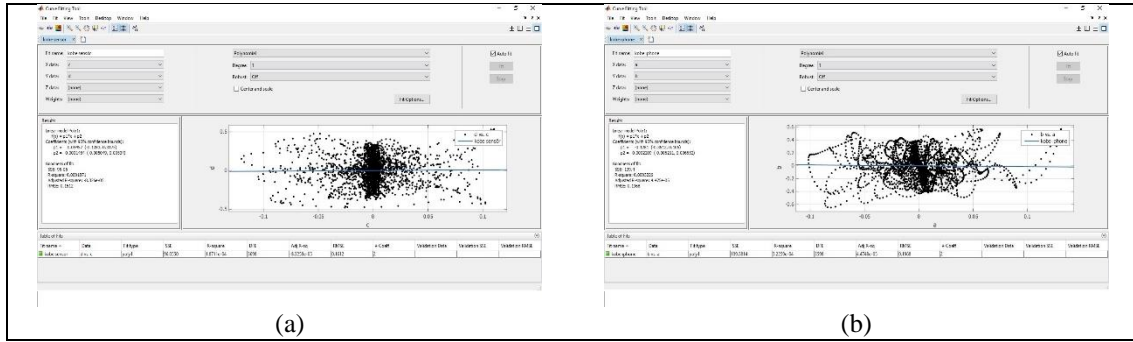


Şekil 7. El-Centro depremi sensör curve fitting grafiği (a), akıllı telefon curve fitting grafiği (b).

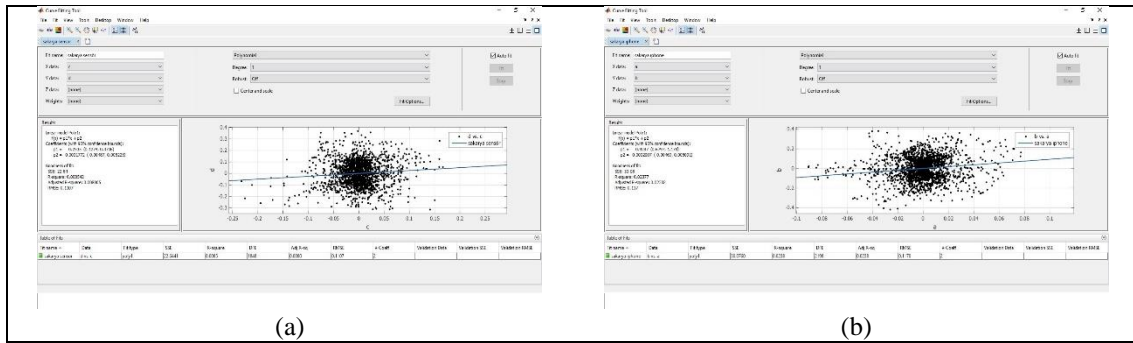


Şekil 8. Loma Prieta depremi sensör curve fitting grafiği (a), akıllı telefon curve fitting grafiği (b).

Eğri uydurma (Curve fitting) polinom derecesinin kontrol edildiği ve uygun eğrinin oluşturulduğu bölümdür. Eğri uydurma, verilere tam ya da yaklaşık olarak uyan fonksiyonlara uygulanan düzeltme işlemidir. Eğri uydurma kontrolünde çizilen referans düzleminin üstünde ve altında kalan veri yoğunluğunun yaklaşık olarak homojen dağılması gerekmektedir. Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde referans düzleminin üstünde ve altında bulunan verilerin yaklaşık eşit ve homojen dağıldığını görülmektedir. Bu durum Matlab içinde bulunan ARX ve ARMAX matematiksel modelin oluşturduğu algorithmada bulunan polinomun derecesinin, curve fitting eğrisi tarafından kontrol edilip uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Kobe depremi sensör curve fitting grafiği (a), akıllı telefon curve fitting grafiği (b).

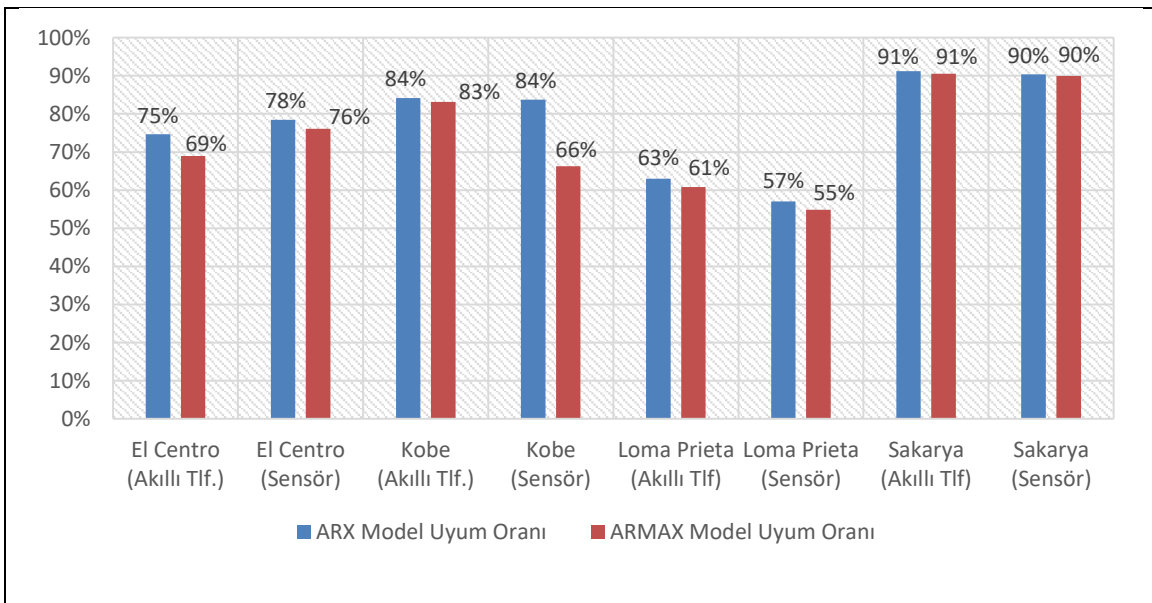


Şekil 10. Sakarya depremi sensör curve fitting grafiği (a), akıllı telefon curve fitting grafiği (b).

Girdi-çıkı arasında yazılan algoritmanın polinom derecesine beyazlık, bağımsızlık ve curve fitting testlerini geçtikten sonra karar verilmiştir. Karar verilen polinom derecesi ile elde edilmiş algoritmanın oluşturduğu uyum oranı, deney sonuçlarında elde edilen girdi-çıkı arasındaki uyum oranları ile karşılaştırılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde, akıllı telefon ve sensörden alınan ivme değerlerinin Matlab ortamında işlenmesi ile elde edilen uyum oranları, bağımsızlık, beyazlık, curve fitting grafikleri verilmiştir. Çalışmada model uyum oranları Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Model uyum oranları.

El-Centro depremi uygulanarak sensörden elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 78 ve 76 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayıları ARMAX için 20,20,20,1; ARX için ise 55,55,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Yine El-Centro depreminin akıllı telefonda elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 75 ve 69 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayıları ARMAX için 25,25,25,2; ARX için ise 45,45,2 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Sonuç olarak, akıllı telefon ile sensörden alınan veriler farklı tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ARX'de akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 4 daha uyumlu olduğu, ARMAX'da ise akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 10 daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca Curve fitting eğrilerinde de iki farklı deprem uygulanarak sensör ve akıllı telefonda alınan hata oranları karşılaştırıldığında, referans çizgisinin altında ve üstünde kalan dağılımın eşit olduğu görülmüştür.

Loma-Prieta depremi uygulanarak sensörden elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 55 ve 57 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayıları ARMAX için 50,50,50,2; ARX için ise 75,75,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Yine Loma-Prieta depreminin akıllı telefonda elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 61 ve 63 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayısı ARMAX için 20,20,20,1; ARX için ise 30,30,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Sonuç olarak, akıllı telefon ile sensörden alınan veriler farklı tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ARX'de akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 10 daha uyumlu olduğu, ARMAX'da ise akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 10 daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca Curve fitting eğrilerinde de iki farklı deprem uygulanarak sensör ve akıllı telefonda alınan hata oranları karşılaştırıldığında, referans çizgisinin altında ve üstünde kalan dağılımın eşit olduğu görülmüştür.

Kobe depremi uygulanarak sensörden elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 66 ve 84 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayısı ARMAX için 80,80,80,1; ARX için ise 130,130,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Yine Kobe depreminin akıllı telefonda elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 83 ve 84 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayısı ARMAX için 40,40,40,1; ARX için ise 80,80,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Sonuç olarak, akıllı telefon ile sensörden alınan veriler farklı tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ARX'de akıllı telefon verilerinin sensör verilerinin aynı olduğu, ARMAX'da ise akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 25 daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca Curve fitting eğrilerinde de iki farklı deprem uygulanarak sensör ve akıllı telefonda alınan hata oranları karşılaştırıldığında, referans çizgisinin altında ve üstünde kalan dağılımın eşit olduğu görülmüştür. Ayrıca Kobe depreminin sensör ivme kayıtları kullanılarak oluşturulan, ARMAX tahmin modelinin ARX modeline göre % 27 daha uyumlu sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Sakarya depremi uygulanarak sensörden elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 90 ve 90 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayısı ARMAX için 38,38,38,1 ; ARX için ise 75,75,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Yine Sakarya depreminin akıllı telefonda elde edilen uyum oranları ARMAX ve ARX'de sırası ile 91 ve 91 olarak bulunmuştur. Ayrıca polinom katsayısı ARMAX için 90,90,90,1 ; ARX için ise 50,50,1 olarak çözülmüş, beyazlık ve bağımsızlık testleri sınır değerler arasında kalmıştır. Sonuç olarak, akıllı telefon ile sensörden alınan veriler farklı tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ARX'de akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 1 daha uyumlu olduğu, ARMAX'da ise akıllı telefon verilerinin sensöre göre % 1 daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca Curve fitting eğrilerinde de iki farklı deprem uygulanarak

sensör ve akıllı telefonda alınan hata oranları karşılaştırıldığında, referans çizgisinin altında ve üstünde kalan dağılımın eşit olduğu görülmüştür.

## SONUÇ

Matlab ortamında bulunan tahmin metotlarının yapı kimliği tanımlanmasında doğru sonuç vermesi, hızlı ve kolay hesaplanabilmesinden dolayı, mühendislik çalışmalarında tercih edilmektedir. Çalışmada deneysel olarak elde edilen girdi-çıkı verileri arasındaki uyumluluk oranları, Matlab programındaki otoregresif ARX ve otoregresif hareketli ortalamalar ARMAX modelinde bulunan tahmin-öngörü ile üretilen girdi-çıkı arasındaki uyumluluk oranları karşılaştırılmıştır. Çalışmada 4 farklı deprem, 2 farklı kayıt cihazı kullanılarak ivme verileri elde edilmiştir. 8 farklı durum incelendiğinde akıllı telefonda elde edilen kayıt verilerinin, sensörden elde edilen kayıt verilerinden daha uyumlu sonuç verdiği görülmüştür. Sensör ve akıllı telefon kayıtları karşılaştırıldığında en büyük farkın Kobe depreminin ARMAX tahmin modelinde olduğu ve akıllı telefonun sensörden %25 daha uyumlu sonuç verdiği görülmüştür. Matlab içinde bulunan matematiksel tahmin modeli olan ARMAX ve ARX, 8 deney çalışması ile karşılaştırıldığı her iki yöntemin, deneysel çalışma verileri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Matematiksel tahmin modelleri karşılaştırıldığında ise, en büyük farkın Kobe depreminin sensör ivme kayıtları kullanılarak oluşturulan, ARMAX tahmin modelinin ARX modeline göre % 27 daha uyumlu sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca diğer deprem kayıtlarının hepsinde ARX tahmin modelinin hem sensör hem akıllı telefonda ARMAX'ya göre daha uyumlu sonuç vermektedir. Çalışmanın sonunda ARMAX, ARX, akıllı telefon ve sensör değerlendirildiğinde, akıllı telefonda alınan ivme verileri kullanılarak Matlab tarafından üretilen ARX tahmin modelinin oluşturduğu algoritmanın kullanılabileceği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışma yapı sağlığı izlemede kullanılan kayıt cihazların tercihinde önemli olmaktadır. Yüksek maliyete ve ölçümleme ücretine sahip sensörler yerine, daha ucuz ve ölçümleme ücreti çok düşük olan akıllı telefonun, yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde sensörlerden daha doğru sonuç verdiği gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Bayhan B, Özdemir G, 2013. Betonarme Binaların Sismik Tepkisinin Tahmininde Ne Ölçüde Başarılıyız. Sarsma Tablası Simülasyonları. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül 2013, Hatay.
- Beyen K, 2007. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Alan Fatih Camiinin Dinamik Karakteristiklerinin Tanımlanması. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, Ankara.
- Catbas FN, Gul, M, & Burkett, JL, 2008. Conceptual Damage-Sensitive Features For Structural Health Monitoring: Laboratory And Field Demonstrations. Mechanical Systems and Signal Processing, 22-(7): 1650-1669.
- Das S, Saha P, & Patro SK, 2016. Vibration-Based Damage Detection Techniques Used For Health Monitoring Of Structures: A Review. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6(3): 477-507.
- Doebing SW, Farrar, CR, Prime, MB, Shevitz, DW, 1996. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. Los Alamos National Laboratory: Los Alamos, NM, USA.
- Durgun GY, Aktaş M ve Kutanis M, 2013. Sarsma Tablasına Yerleştirilmiş 3 Katlı Hasarlı Ve Hasarsız 3 Katlı Çelik Yapı Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül 2013, Hatay.
- Fassois SD, Sakellariou JS, 2007. Time-Series Methods For Fault Detection And Identification In Vibration Structures. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1851), 411-448.
- Kong Q, Allen R M, Schreier L, Kwon YW, 2016. Myshake: A Smartphone Seismic Network For Earthquake Early Warning And Beyond. Science Advances, 2(2):1501055.

- Mahdavi M, 2014. Arı-ı Sarsma Masası Performans Değerlendirmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi .
- Mari E, Shideh D, Jack R, Jonathan DB, Alexandre B and Steven G, 2011. Ishake: Mobile Phones As Seismic Sensors – User Study Findings. Proceedings of the 10th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, December 2011, USA.
- Özçelik Ö, Mısır İS ve Yücel U, 2013. Model Bir Yapının Hasar Tanımlaması Ve Model-Sarsıcı Etkileşiminin Azaltılması İçin Kullanılan Offline İterasyon Tekniği. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül 2013, Hatay.
- Türker H, Mertayak C, Çolak H, 2011. Periyot Hesaplanmasında P-Δ Etkisi: Sarsma Tablası Deneyi. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, Ankara.
- Ulusoy HS, Feng MQ, Fanning PJ, 2011. System İdentification Of A Building From Multiple Seismic Records. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 40(6): 661-674.
- Yılmaz İ, Akdeniz H, 2000. Van Koşullarında Bazı Silaj Sorgum Çeşitlerinde Farklı Ekim Sıklıklarının Verim Üzerine Etkileri. Uluslararası Hayvan Besleme Kongresi, 4–6 Eylül 2000, Isparta.
- Yu Yan, et al, 2015. Initial Validation Of Mobile-Structural Health Monitoring Method Using Smartphones. International Journal of Distributed Sensor Networks 11(2): 274391.
- Wittich CE, Wang X, Hutchinson TC, 2018. Uav-Based Motion Tracking Of A Full-Scale 6-Story Building During Earthquake Shaking. Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, June 25-29 2018, Los Angeles, California.