



Makale / Research Paper

**Kiriş Benzeri Sistemler için Kuvvet Tanı ve Sistem Tanımlama için
Yeni Bir Yaklaşım: Mod Tarif**

Tarık TUFAN^{a*}

^aİstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
İstanbul/TÜRKİYE
*tarik.tufan@medeniyet.edu.tr

Received/Geliş: 22.06.2021

Accepted/Kabul: 24.12.2021

Öz: Yapı sağlığı izleme yöntemleri yapının işleyişi sırasında çevresel titreşimlere maruz iken, sistemi tanımayı ve tanımladığı sistemde mevcut hasarı tespit etmeyi hedefler. Farklı iki noktadan etkiyen kuvvet konumuna göre mod değişkenlerinin hesaplanmayı hedefleyen mod tarif yöntemi, sistem tanımlama adımı modal plan yöntemini kullanır. Modal planlar bu çalışmada serbest titreşimde uygulanan bir yöntem ile üretilmiştir. Serbest titreşim altında sistem tanımlaması için kullanılan bir yöntem çevresel titreşimler altındaki sistem için de kullanılabilirliği bu çalışmada gösterilmiştir. Çevresel titreşim analizlerinde yapıya etkiyen kuvvetler ölçülmez. Fakat kuvvetin hangi noktalardan yapıya etki ettiğini bilmek hasar tespiti için önemli olabilecek bir bilgidir. Çünkü bu bölgelere yakın konumlarda hasar oluşma ihtimali daha yüksektir. Kiriş benzeri sistemlerde modal planlar kullanılarak, kuvvet ölçümü yapmadan kuvvet konumunun tahmini çevresel titreşimler altında yapılabileceği gösterilmiştir. Sistem tanımlama adımıdaki muhtemel hatanın en aza indirilebilmesi için kuvvet etkime konumunun çözümlenme yapılan serbestlik derecesine yakın olmasının ve hedef frekans aralığına göre veri örnekleme sıklığının belirlenmesinin önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mod Plan, Kuvvet Konum Tahmini, Katlama Frekansı, Çevresel Titreşim, Serbest Titreşim

**A New Approach to Force Estimation and System Identification in
Beam-like Structures: Mode Description**

Abstract: Structural health monitoring methods aim to identify the system and therefore the damage in the system during the operation of the structure, the building is exposed to ambient vibrations. The mode description method, which aims to estimate the mode variables according to the force position acting from two different degrees of freedom, uses the modal plot method in the system identification step. Modal plots are produced by a method applied in free vibration. In this study, it has been shown that a method used for system identification under free vibration can also be used for system under ambient vibrations. In ambient vibration analysis, the forces acting on the structure are not measured. However, knowledge about which points the force acting on the structure is an important piece of information for damage detection, because close to these zones, damage is more likely to occur. It has been shown that using modal plans in beam-like systems, force position estimation can be made under ambient vibrations without measuring force. For the system identification step to be performed with minimum error, the input force location must be close to the degree of freedom analyzed and the frequency of data sampling rate should be chosen according to the target frequency range.

Keywords: Modal Plot, Force Location Estimation, Nyquist Frequency, Ambient Vibration, Free Vibration

Bu makaleye atf yapmak için

Tufan, T., "Kiriş Benzeri Sistemler için Kuvvet Tanı ve Sistem Tanımlama için Yeni Bir Yaklaşım: Mod Tarif" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (2); 436-451.

How to cite this article

Tufan, T., "A New Approach to Force Estimation and System Identification in Beam-like Structures: Mode Description" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (2); 436-451.

ORCID ID: *0000-0001-9324-2401

1. Giriş

Yapı Sağlığı İzleme sistemi ve yöntemlerinin (YSİ) sınırları net bir şekilde çizilmiş, katı, bir tanımlanabilir [1]. Örneğin, hasar tespit amacına göre YSİ, mekanik konusunda ihtisas sahibi mühendisler için hasarın varlığını, konumunu ve hasarın tipini belirlemeyi sağlar. Ayrıca, artmaya meyilli olan hasarın şiddeti

- yapının işlev ve işleyişini durduracak
- yapıyı kullananları için bir tehlike oluşturacak
- yapının çevresine zarar teşkil edecek

seviyeye gelmeden, gereken önlemleri almasını mümkün kılan bir araçtır. Bu eşik sınırlar ise tasarımdaki performans seviyesine ve yapının tipine göre farklılık gösterir.

Malzeme ve yapı tasarımı noktasından YSİ, tasarımcılar için

- yapıya etkiyen kuvvetin tipi, davranışı ve frekans içeriğini anlayıp, bu kuvvetler altında malzeme ve yapı davranışını anlaşılması
- yapının inşa edileceği bölgede etkimesi muhtemel kuvvetleri önceden belirleyip bu kuvvetlerin frekans bandından farklı hâkim periyodlara göre yapıyı tasarlanması
- malzeme güvenlik katsayılarını azaltılması [2]
- kesit boyutlarını ideal hale getirilmesi
- sayısal modelden, ölçeklendirilmiş yapıdan ve gerçek yapıdan her birinden alınan tepkiler kullanılarak ayrı ayrı tahmin edilecek sistem parametreleri arasındaki hatanın en az düzeye indirilebilmesi
- mevcut modelleme yöntemlerini geliştirilmesi
- yapıda kullanılacak malzemelerin frekans içeriğine göre tasarım yapılması

konularında araştırma yapmasını sağlayan bir araçtır.

Her iki tanım beraber düşünüldüğünde, YSİ sistemlerinin nihai amacı yapıyı tehdit eden olaylara karşı zamanında gerekli tedbirleri almak ve yapı ve malzeme tasarımına yön vermek şekilde tanımlanabilir [1].

Tarihi yapılar, geniş açıklıklı köprüler ve diğer önemli yapılar zaman içinde çevresel etkilere ilişkili olarak yıpranır ve beklenmedik afetlere bağlı olarak hasar alabilir. Yıpranma ve hasarın tespit edilmesi hem ulaşım sisteminin aksamaması için hem de tarihi mirasın uygun bir şekilde korunabilmesi için önemlidir. YSİ, yapıda farklı şekillerde oluşabilecek hasarın varlığını, konumunu ve şiddetini tespit edebilmek için sistemin sistem tanımlama (İng. System Identification) araçlarıyla çözümlenmesi sağlar. Sistemin kütle ve dayanım gibi özellikleri yerel ve hasarlı şekilde örneğin numune olarak beton kalitesi belirlenerek tespit edilmeye çalışılabilir. Sistem tanıma araçları ise yerel veya genel ve yapıya zarar vermeden kütle ve rijitlik parametrelerini ifade edebilecek farklı değişkenler ile sistemin tahmin edilmesine olanak tanır.

Mod (değişkeni) tanımlama (İng. modal identification), sistem tanımlamada kullanılan yöntemlerden birisi olup, inşaat mühendisliğini uygulamalarında sıklıkla başvurulmaktadır. Mod tanımının amacı incelenen sistemi, özfrekans (İng. natural frequency), mod şekli, modal katılım ve modal sönüm gibi parametreler ile ifade edilmesidir. Bu parametrelerde olan bir değişim yapının kütle veya dayanımında olan değişimden haber verir. Çevresel faktörlerin sistem özelliklerini değiştirmeyeceği düşünülen kontrollü laboratuvar ortamlarında, sistemin rijitliğinde olan bir azalma (hasar) doğrudan modal parametrelerin değişimiyle ilişkili olacağı için, bu koşullardaki hasarın

tespit edilebilmesi için modal değişkenlerin güvenli bir şekilde tespit edilmesi önemli, bu değişkenlerin hangi aralıkta kalabileceğini belirlemek ise daha önemlidir.

Bu çalışmada mod tanımlamaya farklı bir bakış açısı katan mod tarif (İng. mode description) yöntemi önerilmiştir. Mod tarif, sistemin mod şekli ve özfrekans bilgilerinin farklı girdi kuvvet (zorlama) dağılımına bağlı olarak tanımlanmasıdır. Bunun için sisteme etkileyen, girdi, kuvvet dağılımının da tespit edilebilmesi, en azından yaklaşık olarak konumunun tahmin edilmesi gerekir. Hasarla ilişkili olduğu için daha çok itki kuvveti tanımlama üzerine 1970'lerden günümüze birçok çalışmalar yapılmış ve güncel olarak [3-5] da yapılmaktadır. Çevresel titreşimlerde ise, girdi kuvvet beyaz gürültü (İng. white noise) kabulüne [6-8] uygun olması durumunda da kuvvetin uygulandığı noktaların tespiti YSİ için önemlidir ki bu şekilde daha az hata ile sistem tanımlanabilir. Fakat çevresel titreşimler ile ilgili yazınında, kuvvet tahminine yönelik yazarın bilgisi dâhilinde bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, çevresel titreşimler altında kuvvet konum tahmini (yazına yeni olarak) kuvvet tanımlama kısmında aktarılmıştır.

Ayrıca, yazında YSİ sistemleri (oldukça karmaşık olan) gerçek yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı zamanda güncel olarak çubuk ve kiriş benzeri basit sistemler içinde kullanıldığı ve bu konuda araştırmaların yapılmaya devam ettiği görülmektedir [9,10]. Malumdur ki, bir yöntem geliştirildiğinde ilk olarak basit sistemlerden, daha sonra belirli bir ölçükle küçültülmüş deneylerden, gerçek yapı sonlu eleman modellerinden, gerçek yapılara kadar yöntemin geçerliliğinin incelenmesi ve başarılı olduğunun gösterilmesi, önerilen yöntem olan güveni arttırmaktadır.

Farklı bir yöntem olarak gerçek yapılardaki diğer bir uygulaması ise model güncellemedir (ing. model update) [11]. YSİ sistemleri ve yöntemleri ile tahmin edilen gerçek yapıya ait özfrekans, mod şekli bilgilerine göre temsili sayısal modelin özfrekans, mod şekli değerlerinin güncellenmesi için kullanılmaktadır. Fakat nihai amaç herhangi bir sayısal model kullanılmadan yapı üzerinden alınan veriler ile sistemin tanımlanması ve sistemin üzerindeki hasarın tespit edilebilmesidir. Basit kiriş sistemler için modal plan [1] yöntemi ile hasarın varlığı bir modele ve önceki veriye ihtiyaç duymadan yapılabildiği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, 1) serbest titreşimler (İng. Free Vibration) için kullanılan bir yöntemin çevresel titreşim analizleri için de Mod Tarif yöntemi ile mümkün olabileceğinin gösterilmesi ve 2) sisteme etkileyen girdi kuvvetlerin düzeninin modal plan kullanılarak tespiti ve dolayısıyla 3) daha az hatalı mümkünse hatasız bir sistem tanımlama hedeflenmektedir. Vaka Çalışması kısmında kiriş benzeri yapılar için modal plan yöntemi kullanılarak kuvvet konum tespiti için iki önemli kıstas önerilmiştir. Yazarın bilgisi dâhilinde, çevresel titreşimlerde girdi kuvvet konum tahmini yazın için yenilik arz etmektedir. Ayrıca, Modal Planlar [1], serbest titreşimler için geçerli bir yöntem ile üretilerek çevresel titreşim analizlerinde kullanılmıştır. Bu şekilde hem serbest titreşim hem çevresel titreşimler için geçerli olabilecek bir yöntem aktarılmıştır. İki farklı kuvvet konumuna göre üretilen modal planların çakışmadığı (üst üste gelmediği) durumda modal parametre tahmininin %1 ve daha az hata yapılabilirliği gösterilmiştir.

2. Sistem Tanılama

Doğrusal sistemlerde çevresel titreşim esnasında mod çözümlemesi yaklaşımı kullanılabilir. Ayrık sistemlerde (İng. discrete systems) özfrekans ve mod şekli sayısı, teoride yapının serbestlik derecesi (SD) sayısı kadardır. Ölçümde kullanılan algılayıcı (İng. sensor) sayısının, titreşim verilerine dayanarak belirlenen özfrekansların sayısını sınırlandırmayacağı varsayılır; bununla birlikte yüksek modlar çoğu kez genel tepkilere önemli katkı vermediklerinden, ölçümlerden bunların belirlenmesi

mümkün olmayabilir. Mod şeklinin konuma göre belirlenir ve gerçek yapılarda her mod için kullanılan algılayıcı sayısı kadar mod şekli hesaplanabilir.

Ölçümlere bağlı olarak özfrekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik değişkenleri tespit etmek için ilgili yazında birçok yöntem önerilmiştir. Söz konusu yaklaşımları frekans tanım alanı ve zaman tanım alanı yöntemleri olarak iki ana başlıkta sınıflandırmak mümkündür. Frekans tanım alanı yöntemlerinin %0,3'ten yüksek sönüm oranlı sistemler için, zaman tanım alanı yöntemlerinin ise %5'ten az sönüm oranlı sistemler için elverişli olduğu belirtilmiştir [12]. İnşaat Mühendisliği uygulamaları ise genellikle bu iki sınır arasında kalmaktadır.

Fourier dönüşümleri ve frekans tepki fonksiyonları (FTF; İng. Frequency Response Function (FRF)) frekans tanım alanı yöntemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Frekans tanım alanı yaklaşımında, bir tip aktarım fonksiyonu olan ve sistemin dinamiğini gösteren FTF kullanılarak sistem tanımlanır. FTF, tepkinin Fourier dönüşümü ile zorlamanın Fourier dönüşümü arasındaki oran olarak tanımlanır. Bir karmaşık fonksiyon olan FTF'nin büyüklüğündeki tepe noktalarına karşılık gelen frekans değerleri, yapının özfrekansları olarak kabul edilir. Mod şekli ise, her bir algılayıcıda tepe noktaları için okunacak genliklerin oranları ile, FTF'nin açısının birlikte değerlendirilmesi yoluyla belirlenebilir [13]. İşletim yükleri altında zorlamanın güç tayfi yoğunluğunun (GTY; İng. Power Spectral Density (PSD)) veya Fourier dönüşümü tüm frekans değerlerinde yaklaşık eşit olduğu kabul edilecek olursa (beyaz gürültü kabulü)[6-8], tepkinin Fourier dönüşümü ile özfrekanslar ve mod şekilleri doğrudan hesaplanabilir. Zorlamaların beyaz gürültü kabulüne uymadığı durumda ise zorlamaların tarihçelerinin ölçülmesi ve hesaba katılması gerekir. Frekans tanım alanı yöntemlerinin en önemli iki sorunu [14], işletim yükleri altında zaman uzayından frekans uzayına dönüşüm yapılırken yapının özfrekansları ile ilgili olmayan yeni frekanslar üretilmesi (tayf sızıntısı, İng. spectral leakage) ve gürültüsüz veriden gürültülü bir FTF elde edilmesidir.

Zaman tanım alanı yöntemleri de sistem tanımlama ve mod belirlemede sıklıkla kullanılır. Zaman tanım alanı yöntemleri, mod değişkenlerini hesaplarken sadece tepkiyi veya hem tepkiyi hem zorlama tarihçelerini doğrudan kullanarak bir model tanımlar. Modelin incelenen veriyle tutarlı olabilmesi için model boyutunun belirlenmesi önemlidir [15]. Teorik olarak, doğru boyutlu bir model ile sadece gerçek modların hesaplanacağı öngörülür; uygulamada ise, yapının fiziksel modlarından başka, verideki gürültü ve sızıntı gibi istenmeyen etkileri azaltmayı modellediği [16, 17] ve sistemin özellikleriyle ilişkili olmadığı düşünülen hesap modları da üretilir. Ayrıca, gerçek sistemlerde tüm modların tespit edilmesi mümkün olmadığı için uygulamaya göre belli sayıda modun doğru bir şekilde tahmin edilmesi hedeflenir. Model derecesi arttıkça hesap modlarının sayısı da artar. Bu sebeplerden dolayı, model derecesi seçimi ile modların hangilerinin fiziksel hangilerinin hesap modu olduğunun doğru bir şekilde ayırt edilmesi zaman bölgesi yöntemlerinde önemli bir mevzu olup, bu konuda birçok araç mevcuttur. Bu araçların birisi de Kararlılık Şemasıdır (İng. Stabilization Diagram).

2.1. Kararlılık Şemaları (Stabilization Diagram)

Zaman tanım alanı yöntemlerinin bazılarında bir aşamada model derecesinin belirlenmesi gerekir. Model derecesinin kesin olarak belirlenmesi, gerek kullanılan model kabulündeki sapmalar gerek de verideki gürültü dolayısıyla güç bir aşamadır. Model derecesini görece az hata ile belirleyebilmek için, Akaike [18] ve Bayes [15] Bilgi Kıstası gibi yöntemlerden başka, 'Kararlılık Şeması' denen bir yaklaşım da sıklıkla kullanılmaktadır. Kararlılık şeması, belirlenen mod değişkenlerinin artan model derecesine göre kararlılığını gösteren çizgeye verilen addır [19]. Kararlılık Şemalarının çizim ve gösterimi üç maddede özetlenebilir:

- 1) Yeterince yüksek olan bir model derecesi seçilir ve öylece kurulan modelden mod değişkenlerinin değerleri hesaplanır.
- 2) Model derecesi giderek artırılarak mod değişkenleri yeniden hesaplanır ve daha önceki model derecesinde hesaplanan değerler ile karşılaştırılarak hangi modların değişen model derecesine rağmen görülmeye devam ettiği izlenir. Bu süreklilik belirlenirken genelde özfrekans, sönüm oranı ve mod şekline bağlı olan Mod Güvence Kriteri [20] (İng. Modal Assurance Criteria (MAC)) değerleri kıyaslanır.
- 3) Belirli bir model derecesinden sonra her derecede sürekli olarak kendini gösteren modlar kararlı olarak değerlendirilir ve bunların yapısal mod olduğu düşünülür.

Kararlılık Şeması, sık kullanılan bir yardımcı öge olmasına karşın, çok sayıda tekrar adımı ve genellikle kullanıcı müdahalesi istemektedir. Aşağıda, bu değerlendirmeye alternatif olarak tasarlanan yeni bir yöntem olan ‘Modal Plan’ yaklaşımı geliştirilmiştir.

2.2. Modal Plan (Modal Plot)

Modal plan, özfrekans-mod şekli tahminlerinin etkileşiminin gösterildiği bir grafiğe verilen addır. Modal Planlar çevresel titreşim çözümlemelerinde, O3KID (‘Output Only Observer – Kalman filter IDentification’) [22] olarak anılan ve sadece tepki (çıkıtı) ölçümlerine bağlı olarak birinci derece bir dinamik model kurulabilmesine olanak veren yöntemi kullanır. Bu yöntemin bir parçası olan model gerçekleştirme aşaması için ise, ERA [23] olarak anılan Özsystem Gerçekleştirme Algoritmasından (ing. Eigensystem Realization Algorithm) yararlanır. Yüksek model derecesi seçilerek ve hassaslık sınırına göre sayım planları ile modal tanıma yapılabilmektedir. Fakat bu çalışmada, O3KID ile gerekli dönüşüm yapılmadan sadece ERA ile çözümlemeler yapılmıştır. Bu durumda hassaslık sınırına göre modal planda özfrekans ve mod şeklinin beraber ifade edildiği mod noktalarında tahminlerde kümelenme görülmez. Bu durumda sayım planları [21] kullanılmayacağı için mod tarif yöntemi önerilmiştir. Yapılar çevresel titreşimlerden başka sıklıkla serbest titreşim gibi etkilere maruz kaldığı için bu iki farklı yükleme durumu için her iki titreşimde sistem tanımının yapılabileceği bir yöntem geliştirilmek istenilmektedir.

Mod tarif yöntemine uygun olan modal planlar hesap edilirken yanıtlar veri ortalamasını sıfırlama gibi temel işlemlere tabi tutularak büyük boyutlu (3000x3000), kare Hankel Matris Denklem 1 e göre tanımlanmıştır:

$$H_{i-1} = \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} \dots & y_{i+p} \\ y_{i+1} & y_{i+2} \dots & y_{i+p+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i+r} & y_{i+r+1} \dots & y_{i+p+r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada serbest titreşimlerde yapı tepkileri $y_i = CA^{i-1}B$ şeklinde tanımlanır, A durum geçiş matrisini, B girdi matrisi, C matrisi ise yapı tepkisi ile durum vektörünü eşleştiren çıkıtı matrisidir. Tekil değer analizine göre Hankel matrisi çözümlenmiştir (Denklem 2)

$$H_0 = USV^T \quad (2)$$

ve Denklem 3a,3b kullanılarak sistem matrisleri hesaplanmıştır:

$$C = U_1 S_1^{1/2} \text{ (ilk satırı)} \quad (3a)$$

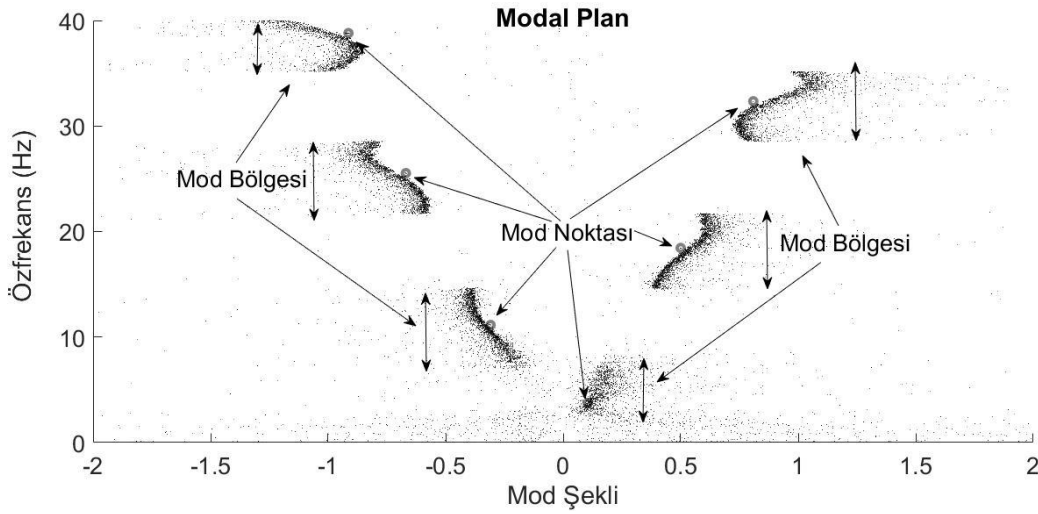
$$A = S_1^{-1/2} U_1^T \mathcal{H}_1 V_1 S_1^{-1/2} \quad (3b)$$

(Durum geçiş matrisi) A 'nın özdeğer analizi ile özfrekans, A matrisi özdeğer vektörleri ile (çıkı matrisi) C 'nin çarpımı ile de mod şekli hesaplanır. Hesaplanan tüm tahminler herhangi bir elemeye tabi tutulmamıştır. Sürekli sistemlerde, hasarın varlığını tespit etmeyi hedefleyen modal plan, bu çalışmada ayrıca farklı kuvvet düzenleri için mod tarif ve kuvvet tanımlama için kullanılabilirliği gösterilmiştir. Mod tarif yönteminde, modal plan kesişim noktalarının doğru bir şekilde gösterilebilmesi için modal planların eğrilere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kümeleme yöntemlerinden birisi olan K-Ortalama Kümeleme (İng. K-Means Clustering) [24, 25] yöntemi ile modal planlar eğrilere dönüştürülmüştür. K-ortalama yönteminde n boyutlu m adet nokta/tahminler k adet kümeye ayrıştırılır; bu işlem yapılırken küme içi kareler farkının en az olması hedeflenir [26]. K-Ortalama Kümelemede amaç fonksiyonu denklem 4'te ifade edilmiştir.

$$J = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K w_{ik} \|x^i - \mu_k\|^2 \quad (4)$$

burada x^i veri noktalarını, μ_k , x^i veri noktalarının ortalamasını, w_{ik} değeri 1 veya sıfır olan ve bu şekilde verinin hangi kümeye ait olduğunu gösteren ağırlık parametresidir.

Bu çalışmada, yeterince küçük frekans aralıklarına göre 2 boyutlu (özfrekans ve mod şekli) olarak 1 adet küme ile ($k=1$) ortalama değerler hesaplanmıştır, böylelikle tamamen gürültü kaynaklı modlar elenmiştir. Mod değişkenleri, farklı kuvvet konumuna göre hesaplanan modal plan eğrilerinin kesişim noktalarına göre hesaplanmıştır. Mod tarif yönteminin mod değişkenleri tahminindeki hata yüzdeleri detaylı bir şekilde dördüncü kısım olan vaka çalışmasında gösterilmiştir.



Şekil 1. Modal Plan

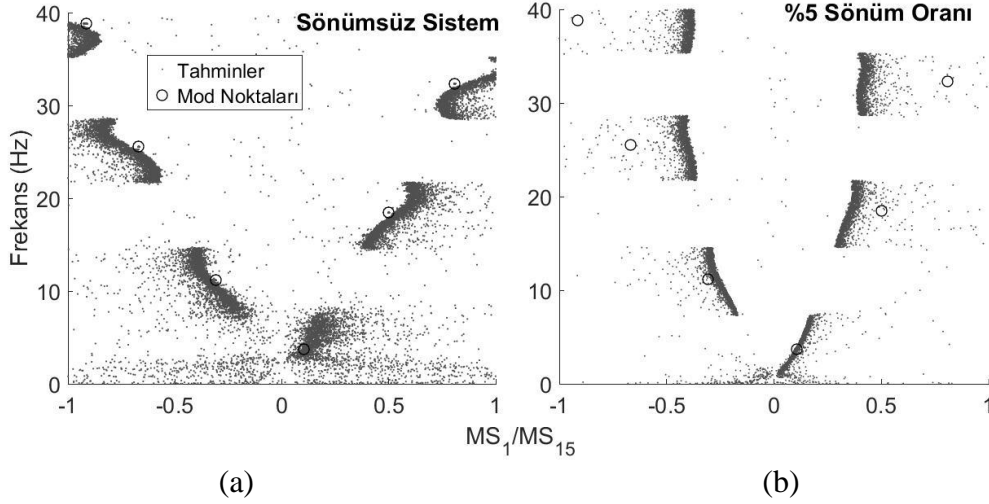
Şekil 1 de temsili bir modal plan gösterilmiştir. Modal plan, sistemin özfrekans ve mod şekli çiftini ifade eden Mod noktalarından ve hasara hassas parametre olarak kullanılabilen Mod Bölgelerinden oluşmaktadır.

3. Kuvvet Tanımlama

Kuvvet tanımlama esas olarak hasarla doğrudan ilişkili anlık, şiddetli (itki) kuvvetlerin konumu tespitinde [27, 28] önem arz etmektedir. Ayrıca, etki eden kuvvetin şekil ve büyüklüğünün de tahmini de üzerinde araştırmaların devam ettiği önemli bir konudur [29, 30]. Fakat çevresel titreşimlere has kuvvet konumunun tespitine yönelik yazında bir çalışmaya rastlanmamıştır. Sistem tanımlama adımında genellikle veride belirli bir itki veya ivme büyüklüğünde olan belirgin değişimler yoksa yapıya etkiyen kuvvetlerin çevresel titreşimlere uygun olduğu kabul edilebilir. Fakat bu kuvvetlerin ve etkime noktalarının tahmin edilmesi önemlidir. Çünkü sistem üzerindeki bir

noktadan etkiyen çevresel titreşim tüm SD'ler için önemli tüm modları (örneğin ilk 6 mod) tespit edilecek düzeyde harekete geçiremeyebilir. Tufan ve Akalp tarafından yapılan çalışmada [21] sönümün, modal plana etkisi incelenirken sönümsüz sistemin her hangi bir SD'den çevresel titreşim uygulanırken tüm modların harekete geçtiği görülmüştür (Şekil 2a). Fakat %5 sönümlü sistemde ise 15inci SD'de etki edilen çevresel titreşimin 1inci SD'de, ilk iki modu belirgin bir şekilde harekete geçirebildiği fakat üçüncü ve diğer modları ise genel sistem tepkisine yeterince katkı sağlayamadığı için tespitinin oldukça zor olduğu Şekil 2b'de gösterilmektedir.

Modal Plan: Sönüm Etkisi (1inci Serbestlik)



Şekil 2. Sönümün modal plana etkisi

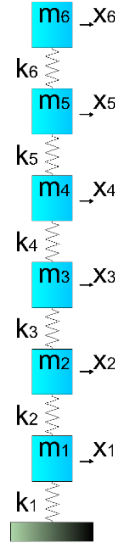
Çevresel titreşimler altında sistem tanımlama adımın en az hata ile gerçekleştirilebilmesi için girdi kuvvet konumunun tespiti önem arz etmektedir. Ayrıca, modal plan ölçüm konumuna göre modların harekete geçirecek enerjinin ne kadar sağlandığını gösteren önemli bir araçtır. Girdi kuvvetler genelde ölçülmediği için girdi kuvvet bilgisinin tepkilerden tahmin edilmesi gerekmektedir. Yalnızca tepki verisiyle elde edilen modal planlar kuvvetin konumuna hassaslık gösterir. Vaka çalışması kısmında kuvvet konum tayinine yönelik modal planlar için iki kistas belirtilmiştir.

4. Vaka Çalışması

Bu kısmın amacı Modal planın kuvvet konumuna hassas olduğunu göstermek ve Mod tarif yöntemini bir örnek üzerinden aktarmaktır. Ayrıca serbest titreşimler için kullanılan bir yöntemin çevresel titreşimler altında mod tarif yöntemiyle kullanımının mümkün olabileceğini gösterilmek istenmiştir.

Bu sayısal çalışma kısmı, parçalı sistemlerde mod tarif ve kuvvet konumunun tespitiyle ilgilidir. Bu amaç için 6 öteleme SD'li bir ucu serbest bir ucu sabit kütle yay modeli incelenmiştir (Şekil 3). Parçalı sistemde tüm kütle değerleri eşit ve 1 kg ve rijitlik değerleri eşit ve 14000 N / m olarak tanımlanmıştır. Öncelikli olarak, 6ncı SD olan serbest uç referans SD olarak seçilmiştir. Çözümlemelerde, SD'leri tek tek referans SD ile beraber ikili olarak incelenmiştir. Her SD'den alınan ve 200 Hz ile okunan beş dakikalık veriler %88 çakışım ile 22 saniyelik veri parçaları halinde denklem 1-3'e göre çözümlenmiştir. Tepkilerin zamana bağlı eğimi olmadığı görülmüş ve sadece yedi saniyelik ve özdeğer analizi ortalamaları kendisinden çıkartılmıştır. Veriler bu hali ile 2933x2933 boyutlu Hankel matrisleriyle çözümlenmiş ve tüm modları barındıran 0-40 Hz frekans aralığına denk geldiği görülen ilk 390 mod değişkeni kullanılarak modal planlar oluşturulmuştur. Tüm SD'lerden sırayla kuvvet uygulandığı altı farklı durum için bu işlemler tekrarlanmıştır. Bunun amacı: 1) Farklı girdi kuvvetlerin beraber değerlendirilmesiyle mod tanımlama yapılması (Mod

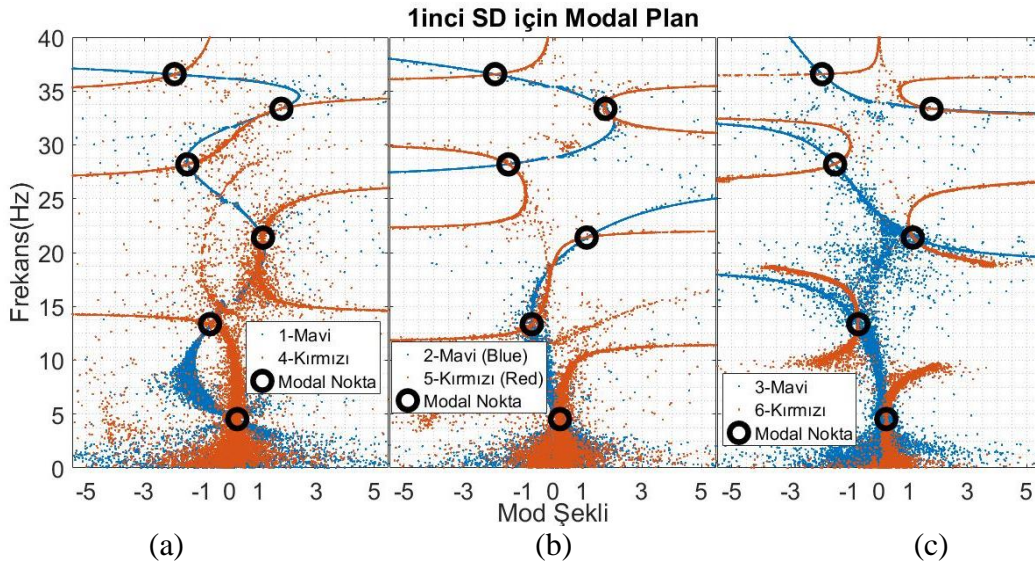
Tarif 2) Modal Planların kuvvet konumuna hassas olduğunun gösterilmesi ve herhangi bir kuvvet ölçümü yapmadan kuvvet konumunu tahmini ile ilgili kıstas belirlenmesi hedeflenmektedir.



Şekil 3. İncelenen Sistem

4.1 ERA' nın Çevresel Titreşim Analizlerinde Kullanılması

Tepkinin bir dönüşüme uğramadan Hankel matrisi dizilimine göre mod değişkenlerin elde edildiği ERA yöntemi serbest titreşimler için geçerli bir yöntemdir. Bu yöntemin önemli bir katkısı tepkinin değiştirilmeden durum uzay gösterimi ile mod değişkenlerinin hesaplanabilmesidir. Bir tepki herhangi bir model ile ilişkilendirilmediği zaman, ilk adımda oluşabilecek model kaynaklı hataları barındırmaz. Çevresel titreşim, yöntemlerinin bir kısmında ise beyaz gürültü kaynaklı tepkinin serbest titreşime dönüştürülmesi gerekir. Örneğin sistem tanımlama kısmında bahsedilen O3KID yöntemi [22] veya Doğal Uyarım Tekniği (İng. Natural Excitation Technique) [31] bu yöntemlerdendir. Bu vaka analizinde farklı kuvvet etkime noktalarına göre tepkide herhangi bir dönüşüm olmadan yalnızca ERA yöntemi ile mod değişkenlerin tespit edilebileceği gösterilmek istenilmiştir. Bu şekilde ERA'nın çevresel titreşim analizlerinde kullanılabilirliği irdelenmiştir.

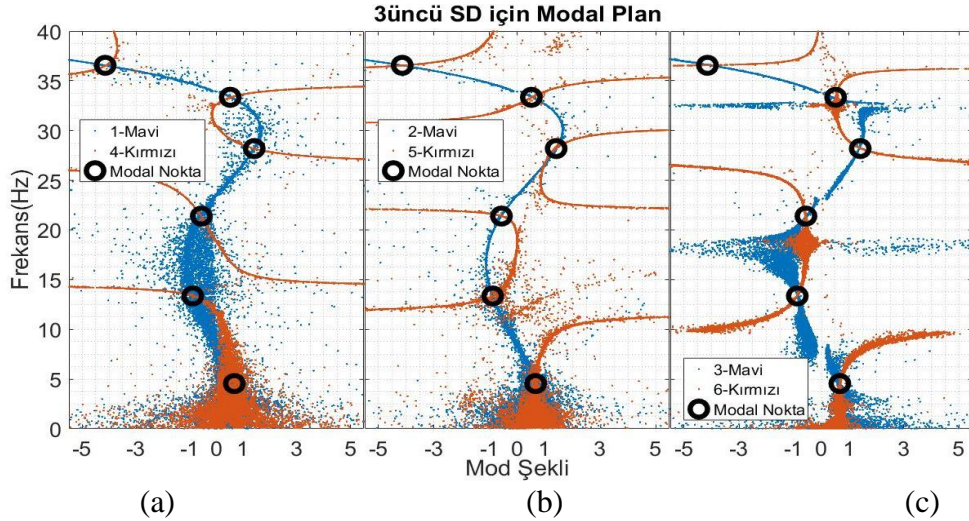


Şekil 4. 1inci SD için Modal Plan

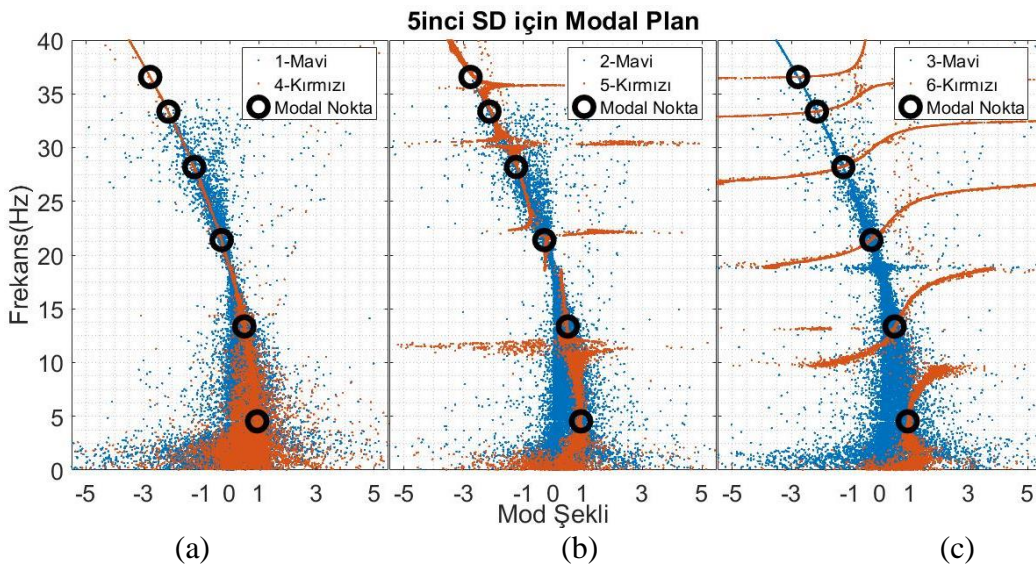
Şekil 4-6’te iki farklı girdi kuvvetine göre ERA ile üretilmiş Modal planların kesişim noktaları mod noktaları (özfrekans ve mod şekli) verdiği görülmektedir. Girdi kuvvet konumları grafikte nokta ile tanımlanmış ve tüm SD’ler için sırayla 1inci-4üncü, 2nci-5inci, 3üncü-6ncı SD etkiyen girdi kuvvetleri için söz konusu etkileşimler incelenmiştir. İlk 2 mod aralığında oldukça gürültü olmasına karşılık Şekil 8-11’de görüleceği gibi yakın bir ölçek ile bakıldığında bu gürültünün mod noktası hesaplamayı biraz güçleştirdiği (Şekil 6) görülmektedir.

Sabit uca yakın olan 1inci SD’de (Şekil 4) neredeyse tüm kuvvet çiftleriyle doğru bir şekilde mod tarif yöntemi ile sistem tanımlama mümkün olduğu görülmektedir. Bir istisna olarak, 2nci ve 5inci girdi kuvvet konumlarına göre oluşturulan Modal Planların kesişimi 2nci ve 3üncü Modal nokta (mod) arasında olduğu görülmektedir (Şekil 4b). Bu istisna dışında mod tarif kesişim noktalarının her zaman mod noktasına yakınında olduğu görülmektedir. Uzun süreli takip edilen sistemler için bu istisnaların sorun teşkil etmeyeceği düşünülmektedir.

Üçüncü SD yapılan çözümlemelerde ise (Şekil 5) ilk iki SD girdi kuvvetlerinde modal planda olan dalgalanmanın oldukça az olduğu ve neredeyse doğrudan mod noktalarında birleştiği görülmektedir. Modal plandan oluşturulan eğrilerin kesişim noktasının her üç kuvvet çifti için sadece mod noktalarında olduğu görülmektedir.



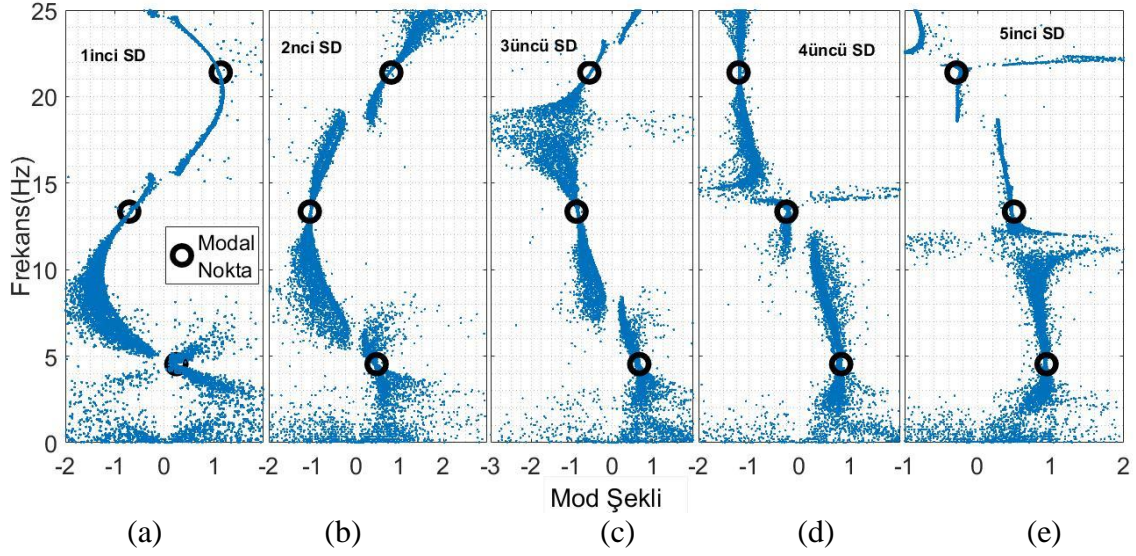
Şekil 5. 3üncü SD için Modal Plan



Şekil 6. 5inci SD için Modal Plan

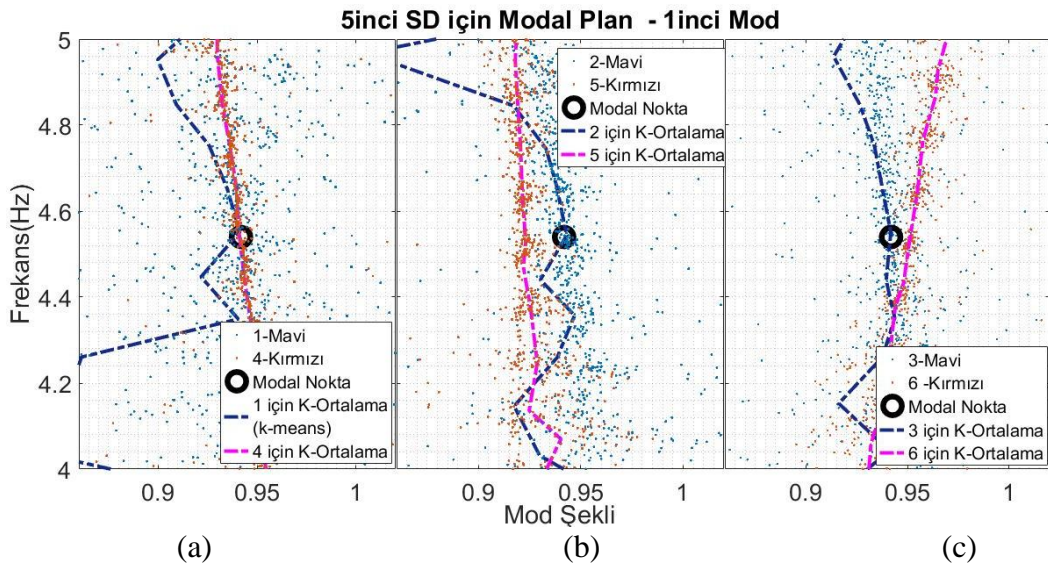
Beşinci SD yapılan çözümlemede ise (Şekil 6) ilk dört modal plan eğrisinin birbirine benzer, dalgalanmanın az ve neredeyse doğrudan modal değişkenleri birleştirecek şekilde olduğu görülmektedir.

Özellikle ilk 2 mod noktası için; girdi kuvvet, çözümlenen SD'ye uygulandığı zaman modal planın, mod noktaları belirten bir çift konik izdüşümüne benzeyen bir yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 7). Bu davranış sadece girdi kuvvetin uygulandığı SD ile çözümlenen SD aynı olduğu durum için geçerlidir.



Şekil 7. Girdi kuvvetin çözümlenen SD'ye uygulandığı durum

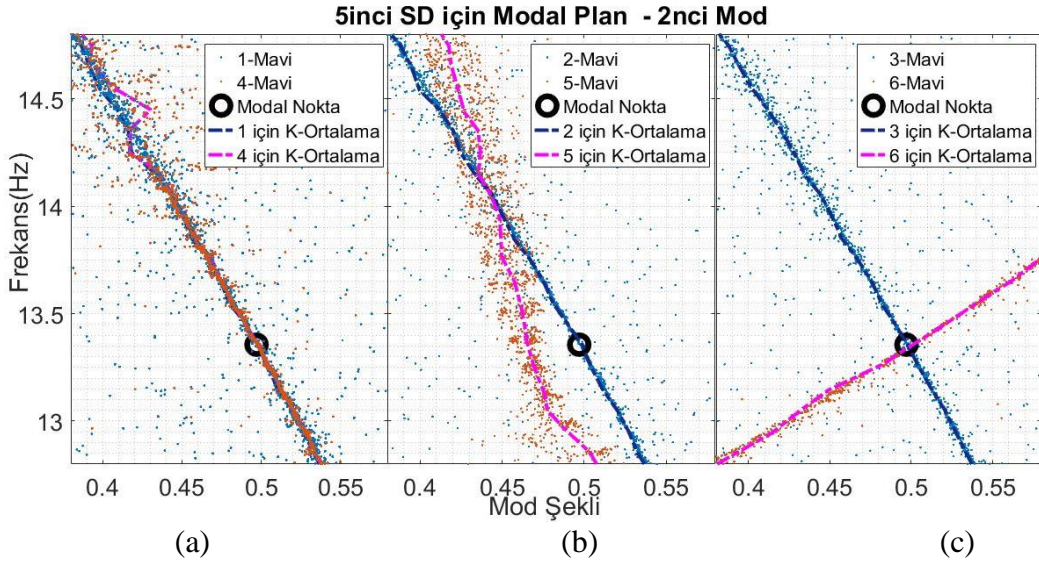
Beşinci SD için gürültü sebebiyle tespit edilmesi mümkün görünmeyen (Şekil 6) modlar detaylı incelendiğinde ve kümeleme yapıldığında mod tarif ile tespit edilebileceği görülmektedir (Şekil 8-11). Bu çalışmanın Modal Plan kısmında aktarıldığı gibi 0.1 Hz frekans aralıkları için sadece k-ortalama yöntemiyle 1 küme seçilmesine zorlanarak modal planlar eğrilere dönüştürülmüş ve gürültülü tahminler böylelikle elenmiştir.



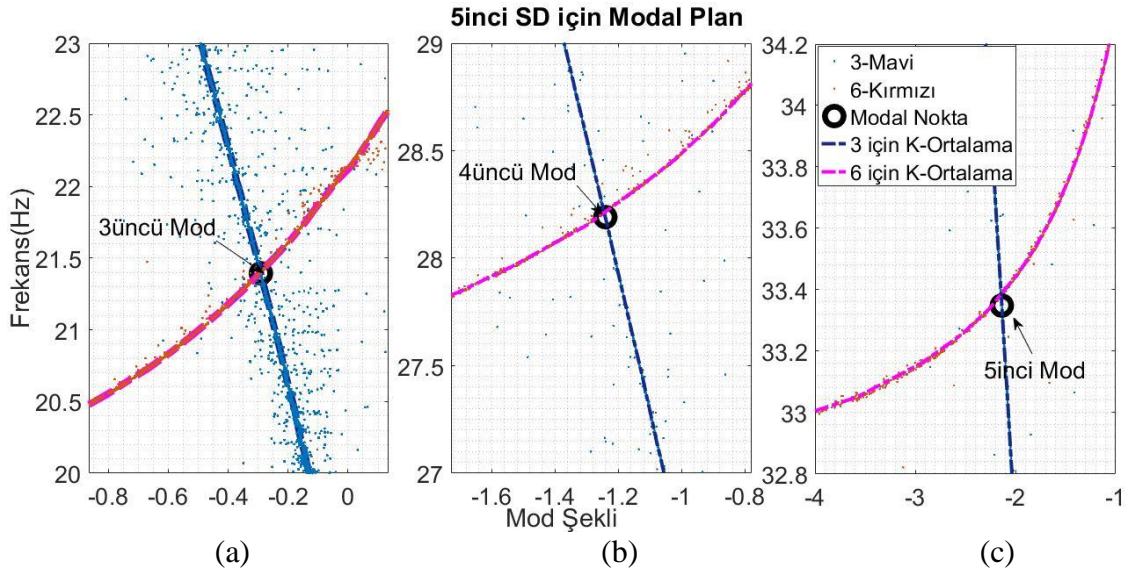
Şekil 8. 5inci SD ve 1inci mod için Modal Plan

Farklı girdi kuvvetine göre elde edilen bu eğrilerin kesişimi mod noktalarına yakın olduğu görülmektedir. Bu tahmin değerleri ile mod noktalarının hata oranlarının gösterildiği grafik şekil 12-16'te tüm SD'leri için verilmiştir.

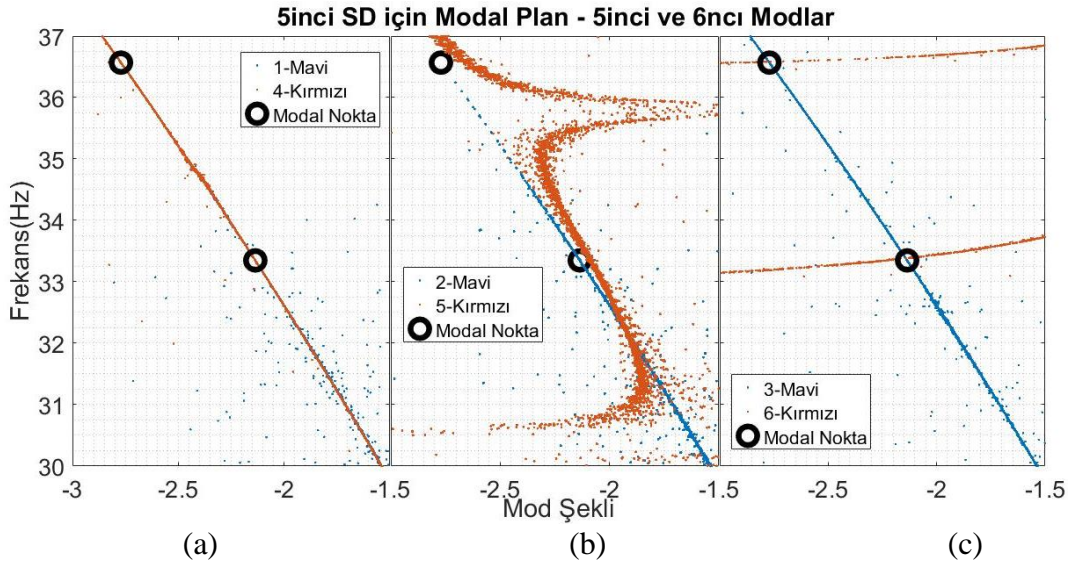
Modal tanımlamada mod noktalarına (özfrekans ve mod şekli) göre toplam hata oranları incelendiğinde Her SD'de farklı kuvvet çiftinin daha uygun sonuç verdiği görülmektedir. En yakın sonuçların ise çözümlene yapılan SD'ye her girdi kuvvetlerinin yakın olduğu durumda elde edildiği görülmektedir. Örneğin 1inci SD için 1inci ve 4üncü kuvvetler için oluşturulmuş modal plan eğrilerinin kesişiminin mod noktalarına oldukça yakın olduğu görülmekte ve %1 ve altında mod noktalarının tahmin edildiği görülmektedir.



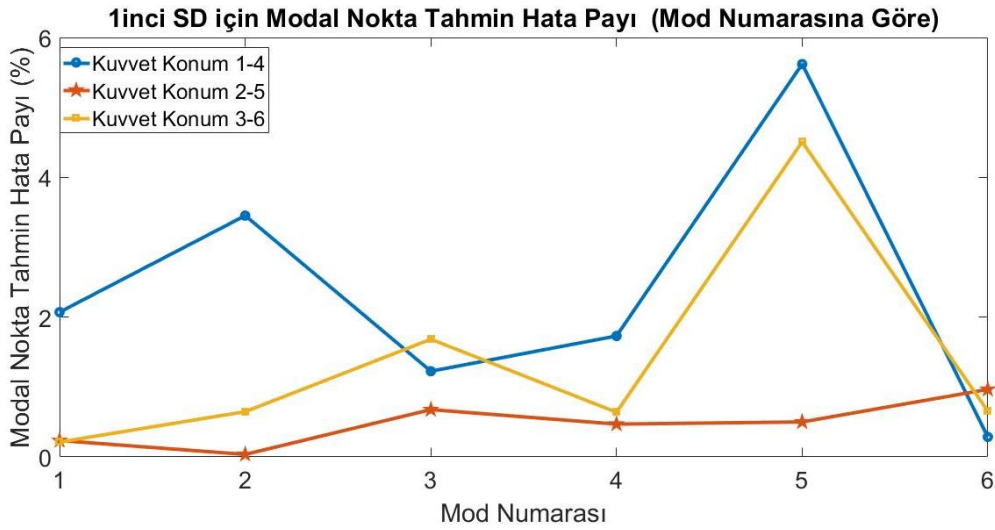
Şekil 9. 5inci SD ve 2nci mod için Modal Plan



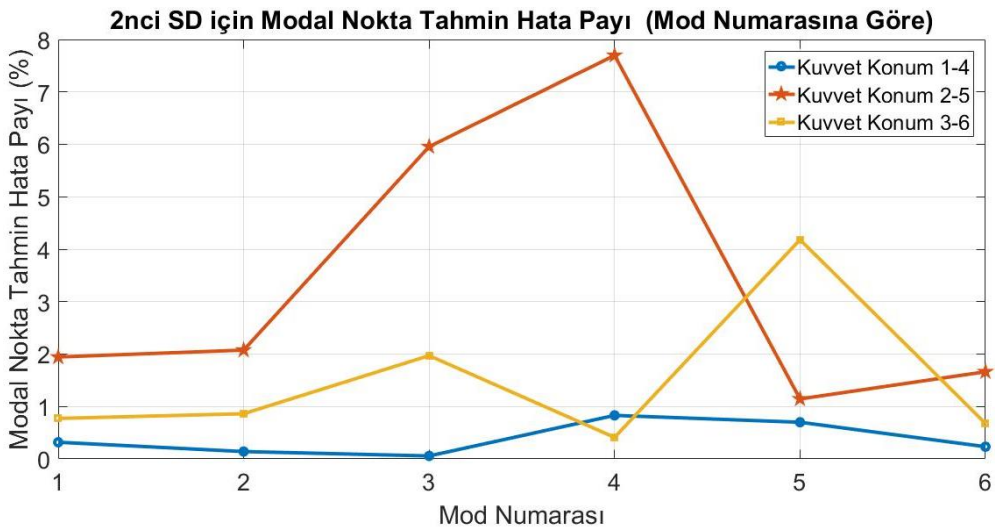
Şekil 10. 5inci SD, çeşitli modlar için modal plan



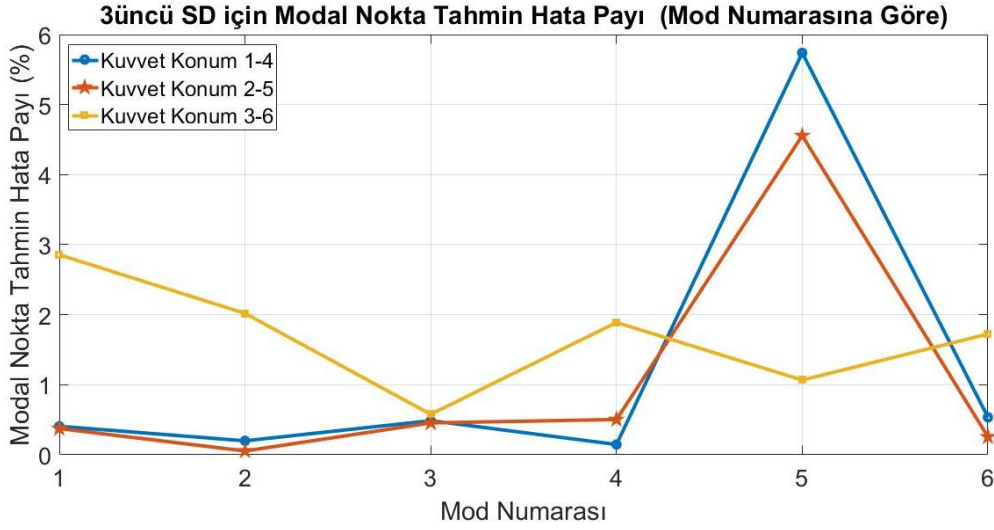
Şekil 11. 5inci SD ve 5inci ve 6ncı modlar için modal plan



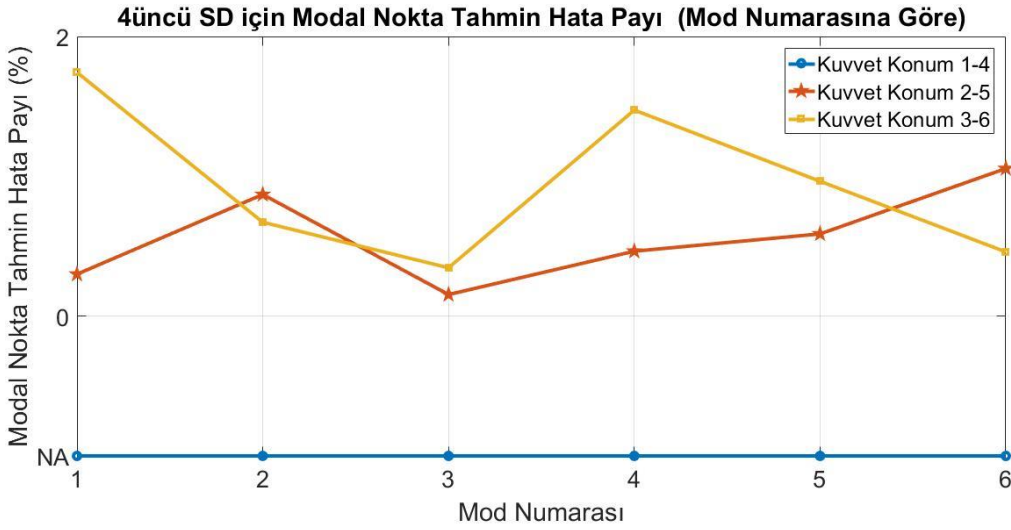
Şekil 12. 1inci SD için mod noktası tahmin hata payı



Şekil 13. 2nci SD için mod noktası tahmini hata payı

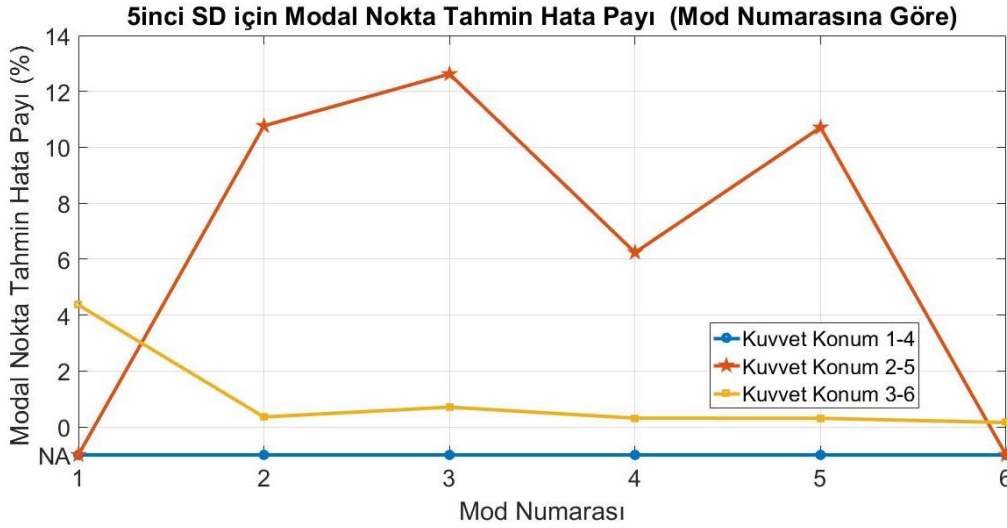


Şekil 14. 3üncü SD için mod noktası tahmini hata payı



Şekil 15. 4üncü SD için mod noktası tahmini hata payı

Şekil 16'da 1-4 kuvvet tipine göre modal planlar çakışık olduğu için bu kuvvet ikilisine göre sistem tanımlama mümkün olmamaktadır. 5inci SD, serbest uç SD'ye en yakın SD olduğu için kuvvet çiftinin yeterince yakın olması gerekmektedir. Modal planlar incelendiğinde ilk dört SD'ne ayrı ayrı kuvvet uygulandığı dört durumda modal planlar oldukça çakışık olduğu görülmektedir. Modal tanımlama yapılan serbestliğe olan uzaklık azaldıkça modal plandaki düşük frekanslarda olan gürültünün azaldığı görülmektedir (Şekil 8). Bu gürültü miktarının fazla olması ilk modun tespitini güçleştirmektedir (Şekil 16). Kuvvet çifti 2-5 içinde yüksek hata görülmesine karşılık, ilk mod dışında 3-6 kuvvet çifti için hata payı %1 altında olduğu görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç ise, örnekleme frekansının yüksek seçilmesi üst sınırı etkilediği gibi alt sınır tahminlerini de etkilemektedir. Üst sınır yazında katlama frekansı (*İng.* Nyquist frequency) olarak bilinmektedir. Fakat alt sınır konusunda yazında bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada algılayıcı ve kuvvet etkime konumuna göre de bir alt sınır tanımlanması gerektiği görülmektedir.



Şekil 16. 5inci SD için mod noktası tahmini hata payı

Kuvvet konumu modal çözümleme yapılan serbestliğe yakın olduğu zaman modal plan eğrisinde dalgalanma artmakta uzak olduğunda ise mod noktalarından geçecek şekilde dalgalanmanın oldukça azaldığı görülmektedir. Ayrıca, referans SD konumuna göre çözümlenen SD öncesi SD'lere ait modal planlarda dalgalanmanın az olduğu ve doğrudan mod noktalarını birleştirdiği görülmektedir. Sonuç olarak, modal plan eğri çiftinin ayrık ve görülen dalgalanma miktarının fazla olduğu SD'lerde çözümleme yapmanın daha uygun olduğu görülmektedir. Bu koşul sağlanması durumunda modal parametreler daha düşük hata yüzdesi ile tespit edilebileceği öngörülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada Mod tarif yöntemi sunulmaktadır. Mod tarif, sistemin mod şekli ve özfrekans bilgilerinin farklı noktalardan etkiyen çevresel kuvvetlere bağlı olarak tanımlanmasıdır. Ayrıca, sistem tanımlamada ERA ile üretilmiş modal planlar kullanılmıştır. Hâlbuki ERA yöntemi sadece serbest titreşimler için kullanılan bir yöntemdir. Burada mod tarif yöntemi ile çevresel titreşim için de geçerli olabileceği gösterilmiştir. Böylelikle serbest ve çevresel titreşimler için geçerli bir çözümlemenin mümkün olabileceği gösterilmiştir. Böyle kapsayıcı bir analiz yönteminin mümkün olması, yazın için önem arz etmektedir. İkinci kısımda sistem tanımlama konusu irdelenmiş ve modal plan yöntemi aktarılmıştır. Modal planlarının k-ortalama yöntemiyle eğrilere dönüştürülebileceği ilk kez bu çalışmada gösterilmiştir. Modal tanımlama bu k-ortalama yöntemiyle elde edilen eğriler üzerinden yapılmıştır. Üçüncü kısımda ise kuvvet tanıma ile ilgili öz bilgi verilerek çevresel titreşim analizleri için de kuvvet konumu tespitinin gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmanın vaka analizi kısmında ise, sistem tanımının ideal yükleme konumlarına göre özfrekans ve mod şeklinin beraber tespitinin toplam %1 den düşük hata yüzdeleriyle ERA yöntemiyle yapılabileceği gösterilmiştir. Yazarın bilgisi dâhilinde serbest titreşim için geçerli bir yöntem ile çevresel titreşimin analiz edilebilir olduğunun gösterilmesi yazın için bir yeniliktir. Çözümleme yapılan SD ile girdi kuvvet konumunun yakın olmasının önemi gösterilmiş ve modal tanımlamadaki gürültünün azaltılabilmesi için ise örnekleme sıklığının hedef frekans aralığına bağlı seçilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır. Yazında yer alan çalışmalarda sıklıkla katlama frekansına dikkat edildiği fakat çözümlenebilecek en alt frekansa dikkat edilmediği görülmektedir. Bu çalışma ile alt frekans sınırının da önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, kuvvet konumunun tahmini için modal planlar üzerinden bir kıstas belirtilmiştir: Bu kıstasa göre modal plan eğrisinde olan dalgalanma miktarının büyüklüğü ve sıklığı kuvvet konumun çözümleme yapılan SD'ye yakınlığına göre değiştiği (arttığı) gösterilmiştir. Bu kıstasa göre çevresel titreşimler altında girdi kuvvet ölçümü

yapılmadan sadece zorlama bilgisine göre, girdi kuvvet konumu tahmini kısıtlı olarak da olsa yapılabilmektedir.

Yazarın Katkıları

TT makaleyi yazdı, son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Tufan, T., An investigation of system identification and damage estimation using modal plots, count plots and a damage indicator, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2019.
- [2]. Derriso, M. M., Olson E. E. and DeSimio M. P., Military Aircraft, In Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Wiley, Blackwell, Hoboken, NJ, USA, 2009, 1.
- [3]. Qiao, B., Ao, C., Mao, Z., and Chen, X., Non-convex sparse regularization for impact force identification, Journal of Sound and Vibration, 2020, 115311.
- [4]. Manns, L., Michael M., and Akbar K., Impact force identification on composite aerospace structures under flight conditions, In APISAT 2019: Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Engineers Australia, 2019, 25.
- [5]. Saleem, M. M., and Hongki J., Impact force localization for civil infrastructure using augmented Kalman Filter optimization, Smart Structures and Systems, 2019, 23, 2, 123-139.
- [6]. Yang, J. N., Application of optimal control theory to civil engineering structures, Journal of the engineering Mechanics Division, 1975, 101(6), 819-838.
- [7]. Peeters B., System identification and damage detection in civil engineering, Doktora Tezi, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- [8]. Ren W. X., Zong Z. H., Output-only modal parameter identification of civil engineering structures, Structural Engineering and Mechanics, 2004, 17(3-4), 429-444.
- [9]. Krishnanunni, C. G., Raj, R. S., Nandan, D., Midhun, C. K., Sajith, A. S., and Ameen, M., Sensitivity-based damage detection algorithm for structures using vibration data, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2019, 13;9(1):137-51.
- [10]. Vashisht, R., Viji, H., Sundararajan, T., Mohankumar, D., and Sumitra S., Structural Health Monitoring of Cantilever Beam, a Case Study—Using Bayesian Neural Network and Deep Learning, In Structural Integrity Assessment, Springer, Singapore, 2020, 749-761.
- [11]. Beyen, K., Titreşim verisiyle güncellenmiş sonlu eleman modeliyle hasar simülasyonu, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2017, 32(2).
- [12]. Heylen W., Lammens S., Sas P., Modal analysis theory and testing. Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 1997.
- [13]. Armstrong D.M., Sibbald A., Fairfield C.A., Forde M.C., Modal analysis for masonry arch bridge spandrell wall separation identification, NDT & E International, 1995, 28(6), 377-386.
- [14]. Schoukens J., Pintelon R., and Rolain Y., Time domain identification, frequency domain identification. Equivalencies! Differences?, In American Control Conference, Proceedings of the 2004, IEEE, 2004(1), 661-666.
- [15]. Schwarz G., Estimating the dimension of a model, The annals of statistics, 1978, 6(2), 461-464.
- [16]. Zhang L., Yao Y., and Lu M., An improved time domain polyreference method for modal identification, Mechanical Systems and Signal Processing, 1987, 1(4), 399-413.
- [17]. Zhang L., Wang T., and Tamura Y., A frequency–spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis, Mechanical systems and signal processing, 2010, 24(5), 1227-1239.

- [18]. Akaike H., A new look at the statistical model identification, *IEEE transactions on automatic control*, 1974, 19(6), 716-723.
- [19]. De Roeck G., Peeters B., and Ren W. X., Benchmark study on system identification through ambient vibration measurements, In *Proceedings of IMAC-XVIII, the 18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, Texas, 2000, 1106-1112.
- [20]. Allemang, R. J., The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse, *Sound and vibration*, 2003, 37(8), 14-23.
- [21]. Tufan T., Akalp S., Modal plot - System identification and fault detection, *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, e2347.
- [22]. Vicario F., Phan M. Q., Betti R., and Longman R.W., Output-only observer/Kalman filter identification (O3KID), *Structural Control and Health Monitoring*, 2015, 22(5), 847-872.
- [23]. Juang J.N., Pappa R.S., An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 1985, 8(5), 620-627.
- [24]. McRAE D.J., K-means clustering using multivariate data, *Classification Soc. Bull*, 1970, 2(2), 62.
- [25]. Perera, R., Torres, L., Ruiz, A., Barris, C. and Baena, M., An EMI-Based Clustering for Structural Health Monitoring of NSM FRP Strengthening Systems, *Sensors*, 2019, 19(17), 3775.
- [26]. Hartigan J.A., Wong M.A., Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 1979, 28(1), 100-108.
- [27]. Ohkami Y., Tanaka H., Estimation of the Force and Location of an Impact Exerted on a Spacecraft, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 1998, 41, 4, 829-835.
- [28]. Qiao, B., Mao, Z., Liu, J., Zhao, Z. and Chen, X., Group sparse regularization for impact force identification in time domain, *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 445,44-63.
- [29]. Qiu, B., Zhang, M., Li, X., Qu, X., Tong, F., Unknown impact force localisation and reconstruction in experimental plate structure using time-series analysis and pattern recognition, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 166:105231.
- [30]. Oskoui, E.A., Taylor, T., and Ansari, F., Method and sensor for monitoring weight of trucks in motion based on bridge girder end rotations, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 3;16(3):481-94.
- [31]. James, G.H., Carne. T. G., Damping measurements on operating wind turbines using the natural excitation technique (NExT), In *11th ASME Wind Energy Symposium presented at the Energy Sources Technology Conference and Exhibition*, 1992, 12, 75-81.