

# ANALİZ DOĞRULAMA ÇALIŞMALARINDA SAHA ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

Alperen Çakmak<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Bilgisayar destekli mühendislik araçları, ürün geliştirme sürecinin farklı aşamalarında kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile karmaşık yapıların yapısal karakter ve frekans yanıtlarının hesaplanması fikri 20. yüzyılın ortalarında sunulmuştur [1]. Zamanla, sonlu elemanlar yöntemi akışkanlar, termodinamik, akustik, elektromanyetik gibi farklı alanlarda uyarlanmıştır. Günümüzde ticari yazılımlar ile kolay erişilebilen sonlu elemanlar analiz programları, mühendislik çalışmalarının vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Tasarlanan yapıların/sistemlerin işlevlerini sağlama becerisi prototipleme öncesinde sanal ortamda kurulmuş modeller ve sonlu elemanlar analizleri ile irdelenebilmektedir.

Elde edilen sonlu elemanlar analizi sonuçlarının, söz konusu mühendislik yapılarının gerçek davranışı-

nı yansıtabilme becerisi doğrulanmalıdır. Bunu sağlamak için, Test ve Ölçüm çalışmaları kapsamında doğrulamaya yönelik deneysel uygulamalar yapılmaktadır. İncelenen yapı/sistem ve ilgilenilen fiziksel büyüklüğe/olguya göre farklı test uygulamaları ile sonlu elemanlar modelinin doğrulanması sağlanabilir. Bu yazıda, çeşitli analiz doğrulama uygulamaları, kullanılacak ekipmanlar ve dikkat edilmesi gereken konular anlatılmıştır.

## SONLU ELEMANLAR MODELİ – HAREKET/YER DEĞİŞTİRME DOĞRULAMALARI

Testler ile ölçülecek hareket büyüklükleri (yer değiştirme, hız, ivme), analizlere girdi olarak verilmenin yanı sıra sonlu elemanlar analizlerinin doğrulanmasında da kullanılabilir. Doğrudan yer değiştirme ölçümleri için

<sup>1</sup> BİAS Mühendislik, Test Ölçüm Projeleri Takım Lideri - [acakmak@bias.com.tr](mailto:acakmak@bias.com.tr)

uygulamaya bağılı olarak ipli yer değiştirme sensörü, lazer yer değiştirme sensörü ve benzerleri; ivme ölçümleri için ise ivmeölçerler kullanılabilir. Yüksek frekanslı hareketlerin gözlenmek istendiği uygulamalarda, yer değiştirme sensörleri tepki süreleri yönüyle yetersiz kalabilmektedir. Böyle uygulamalar için frekans yanıtları dinamik uygulamaları ölçmeye daha uygun olan ivmeölçerler yeğlenmelidir. Deneysel yollarla toplanan hareket büyüklükleri gerekli sinyal işleme adımları ile farklı büyüklüklere dönüştürülebilir. Bu dönüşüm yapılırken, özellikle ivme verilerinden yer değiştirmeye geçilirken, kullanılan sensörlerin frekansa bağılı ölçüm yetenekleri mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

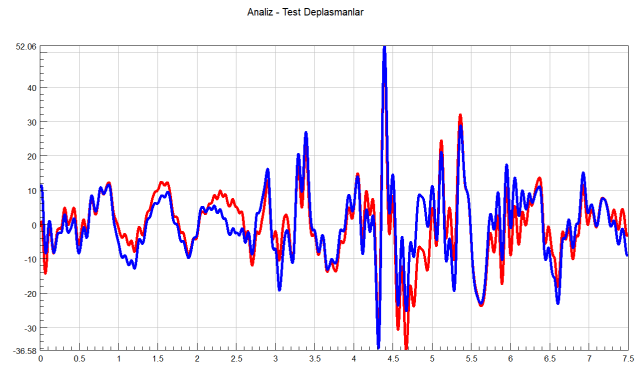
MEMS (mikro elektromekanik sistemler) tabanlı ivmeölçerler statik ivme değerlerini dahi ölçebilirken, piezoelektrik kristal tabanlı ivmeölçerlerin düşük frekans (<1 Hz) ölçüm yetenekleri sınırlıdır [2]. Bu kısıt, piezoelektrik kristal tabanlı ivmeölçerler ile toplanan ivme verilerinden yer değiştirme hesabında ek filtreleme işlemlerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Ölçülen yer değiştirme verilerinden hız veya ivme büyüklüklerine geçme işleminde de yüksek frekanslı bileşenlerin etkisine dikkat edilmelidir. Yer değiştirme verisinin içinde bulunabilecek, gerçeği yansıtmayan yüksek frekanslı bileşenler, türev alma işlemi ile (yer değiştirme → hız, yer değiştirme → ivme) sinyalde baskın duruma gelebilir. Bu yüksek frekanslı bileşenler, sabit parazit veya yerel "pik atma" kaynaklı olabilir ve giderilmesi gerekir.

Hareket büyüklüklerinin ölçülmesine yönelik test uygulamalarında sensör yerleşimlerine dikkat edilmesi gerekir. Kullanılacak sensörün dinamik yanıt özelliklerinin yanı sıra ilgili sensörün konumlandırıldığı yapı(lar) da elde edilecek verilerin doğruluğunu etkilemektedir. Kullanılan sensörler, konumlandırıldıkları yapının tümünün değil, konumlandırıldıkları noktaların yerel hareketleri algılamaktadır. Hareket/yer değiştirme ölçümlerinin yapının tümünün hareketini doğrulamak için yapıldığı düşünülürse sensörün uygulandığı konumun yerel davranışının bütünsel (global) davranıştan farklı olmaması gerekecektir. Bu koşul, sensör yerleştirilen konumun yüksek katılıkta olmasına dayanarak, yapının bütünsel hareketlerinin izlenmesi ile mümkündür. Bu koşulun sağlanamadığı ölçümlerde yerel hareket davranışlarının ek sinyal işleme uygulamaları ile yok edilip bütünsel hareketlerin hesaplanmasını da gerektirmektedir.

Şekil 1'de ipli yer değiştirme sensörü ve ivmeölçer uygulanmış bir araç aksı gösterilmiştir. Burada aks üzerine yerleştirilen ivmeölçer, yol tahrikleri ve aks yer değiştirmesinin belirlenmesi; şasi ve aks arasına yerleştirilen ipli yer değiştirme sensörü enkoder de şasinin yol tahrikleri altında aksa göre bağılı yer değiştirmelerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Yol tahrikleri sonucu ortaya çıkan şasi yer değiştirmelerinin sonlu elemanlar analizi ve test yöntemiyle elde edilen değerlerinin karşılaştırması sunulmuştur. Yapılacak doğrulama çalışmaları ile modelde özellikleri ölçülemeyen elemanların (örneğin: lastik) tanımlanması da sağlanabilir [3].



(a)



(b)

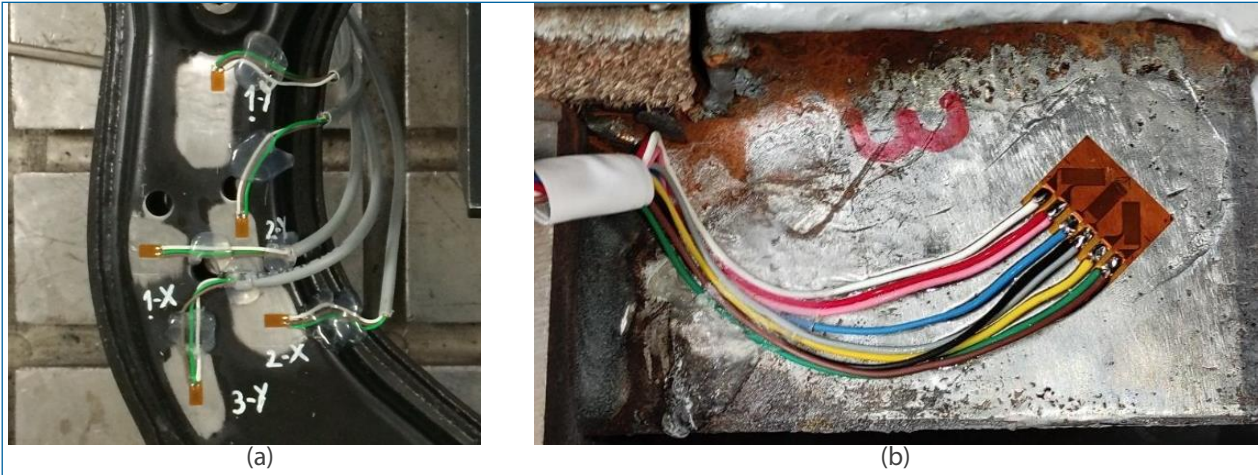
**Şekil 1.** Aks Yer Değiştirme Doğrulama, (a) İvmeölçer ve İpli Yer Değiştirme Sensörü Yerleşimi, (b) Analiz - Test Yer Değiştirme Karşılaştırma (Kırmızı: Analiz, Mavi: Test)

## SONLU ELEMANLAR MODELİ – GERİNİM/GERİLME DOĞRULAMALARI

Mühendislik çalışmalarında yapıların dayanımları, öncelikli kaygılardandır. Yapıların dayanımları, kullanım koşullarına ve öngörülen ömür sürelerine/çevrimlerine göre incelenmektedir. Sonlu elemanlar ortamında yapılan çalışmalarla prototipleme aşamasında yapıda oluşacak gerilmeler hesaplanabilmektedir. Hesap edilen gerinimlerin/gerilmelerin doğruluğunun teyidi sonlu elemanlar analizleri ve buna bağlı tasarım çalışmalarının geçerli olabilmesi için zorunludur.

tadır. Doğrusal ve rozet gerinim ölçer pulları Şekil 2'de paylaşılmıştır.

Test ile ölçülen gerinimler doğrudan yüzey üzerinden alındığı için elastik – plastik davranış gözlemlenebilmektedir. Sonlu eleman analizlerinde ise işlem yükünün azaltılması ve basitleştirme adına hesap tamamen elastik olarak kurgulanabilmektedir. Parçanın elastik limitler üzerinde zorlandığı durumlarda, sonlu elemanlar modelinin baz malzemesinin elastik – plastik davranışının da tanıtılması gerekmektedir. Benzer şekilde, deneysel gerinim ölçümü alınacak konumlar dikkatle belirlenmelidir. Çentik etkileri ve geometrik süreksizliklerin bulunduğu konumlarda sonlu elemanlar modeli ger-

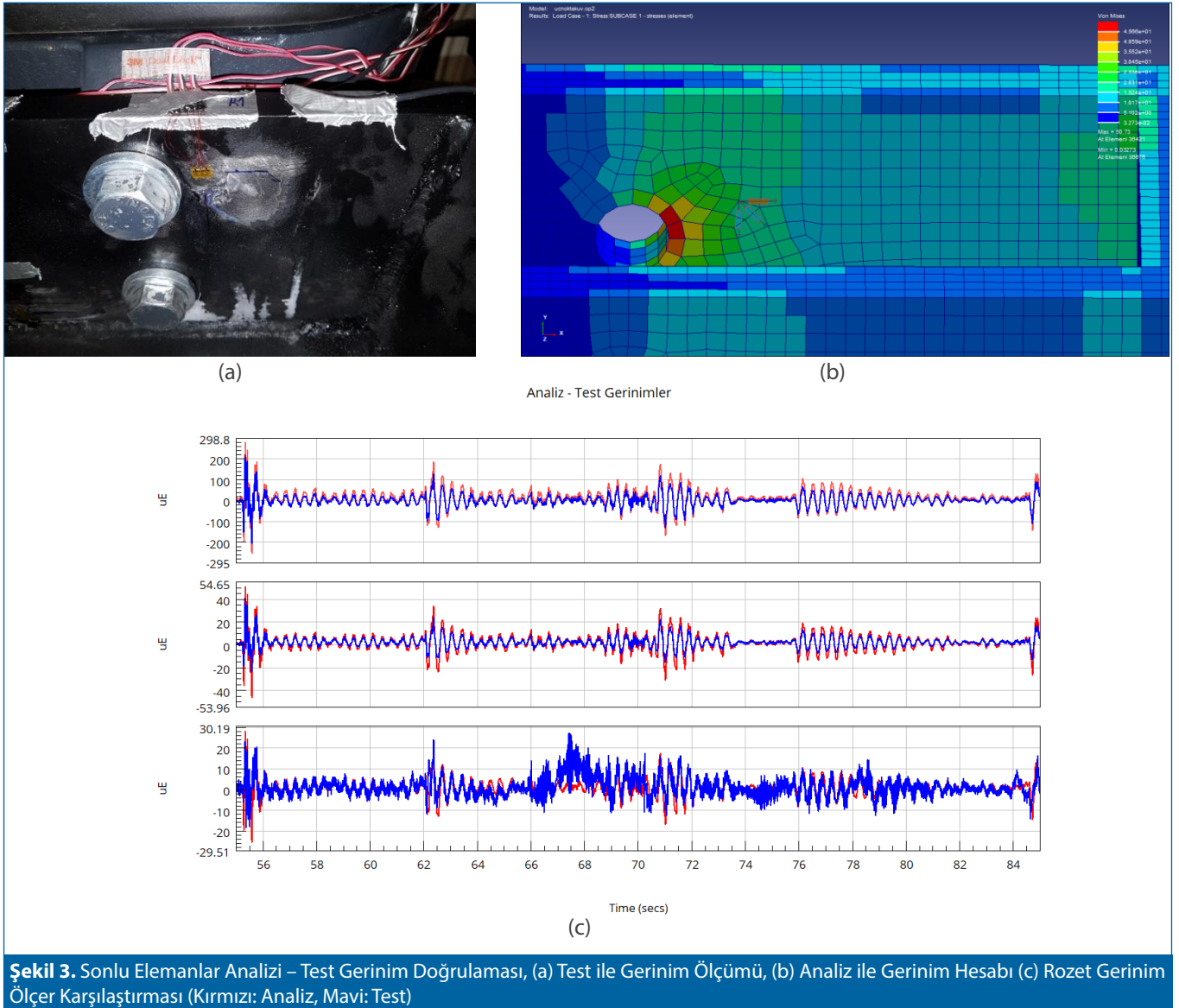


Şekil 2. Gerinim Ölçer Pulu Uygulaması, (a) Doğrusal Gerinim Ölçer, (b) Rozet Gerinim Ölçer

Yapısal sonlu elemanlar modelinde, hesap edilen gerinim ve gerilme zorlanmaları deneysel çalışmalarla doğrulanabilir. Gerinim ve gerilme değerlerinin deneysel yolla elde edilmesi için gerinim ölçer pulları kullanılmaktadır. Gerinim ölçer pulları doğrudan uygulandığı yüzey bozulmalarını ölçtüğü için uygulaması oldukça hassas bir işlemdir. Uygulamada özel yüzey koşullandırıcı ve yapıştırıcılar, zorlu ortam koşulları için de ek kaplamalar kullanılmalıdır. Ayrıntılı uygulama önermeleri gerinim ölçer tedarikçileri tarafından sağlanmaktadır [4]. Sonlu elemanlar modeli veya mühendislik öngörüsü sayesinde asal/kritik gerilmelerin yönünün bilindiği durumlarda, tek doğrultuda ölçüm alan doğrusal gerinim ölçerler kullanılabilir. Orantısız olmayan çok eksenli yükleme (zamanla değişen asal gerilme yönleri) veya karmaşık geometrilerde ise ölçüm için rozet gerinim ölçerler yeğlenmelidir. Rozet gerinim ölçer pulları, yüzey üzerinde üç yönden alınan ölçüm ve cebirsel işlemler ile gerilme tensörünün elde edilmesine olanak sağlamak-

çek davranıştan sapan sonuçlar sunabilir. Geçerli karşılaştırmanın elde edilebilmesi için yapı üzerinde "nominal kesit" olarak adlandırılan, geometrik süreksizliklerden uzak konumlara gerinim ölçer yerleştirilmeli ve yerel sonuçlar ile karşılaştırılmalıdır.

Mühendislik yapıları üzerinde deneysel gerinim ölçümü çalışmalarında, yapısal kısıtlardan ötürü tek gerinim ölçer ile köprüleme yaygındır. Gerinim doğrulaması dinamik olarak zorlanan veya statik yüke maruz kalan yapılar için gerçekleştirilebilir. Doğrulama ölçümlerinin sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılabilir olması için, yapının ve yapıya etkileyen zorlanmaların doğru bir şekilde etkilmesi zorunludur. Deneysel çalışmalarda etkileyen yükün denetlenmediği durumlarda, gerinim ölçümünün yanında etkileyen zorlanmayı niteleyen ölçümlerin de alınması önerilmektedir. Etkileyen zorlanmayı niteleyen dış ölçümler (kuvvet, ivme gibi) ile sonlu elemanlar analizi güncellenip deneysel çalışmalar ile karşılaştırılabilir.

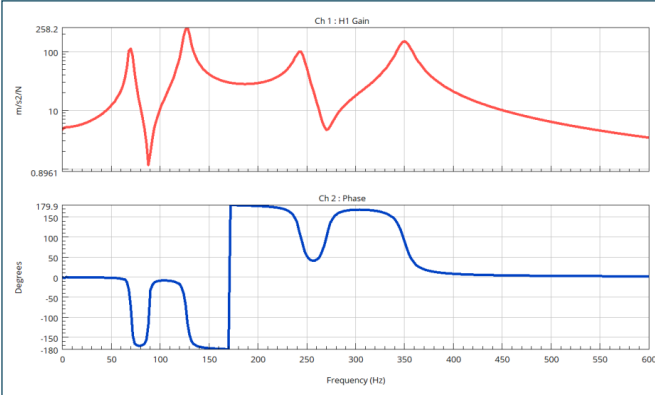


DeneySEL gerinim ölçümü ile sonlu elemanlar modelinin doğrulanmasına ait örnek bir çalışma çıktıları Şekil 3'te sunulmuştur. DeneySEL çalışmalar ile yapıda oluşan gerinme/gerilmeler ölçülebileceği gibi yapı üzerinde kalibre edilen gerinim ölçerler ile etkiyen dış zorlanmalar/kuvvetler de elde edilip sonlu elemanlar ortamında kullanılabilir [5, 6].

## SONLU ELEMANLAR MODELİ – DİNAMİK KARAKTER DOĞRULAMALARI

Yapısal sonlu elemanlar modellerinin doğrulanması, yapıların dinamik karakterlerinin incelenmesi ile de sağlanabilmektedir. Bir yapının dinamik karakteri sisteme verilen fiziksel girdi karşılığı alınacak fiziksel çık-

tıyı ifade eden bağıntılar bütünüdür. Bu bağıntılar, söz konusu girdinin farklı frekanslarda harmonik olarak etki etmesi durumunda alınacak harmonik çıktıyı niteler. Fiziksel yapılar için bu bağıntılar "frekans yanıt fonksiyonu" olarak anılır. Çok serbestlik dereceli bir sistemin kuvvet girdisine karşılık ivme çıktısını niteleyen frekans yanıt fonksiyonu Şekil 4'te verilmiştir. Frekans yanıt fonksiyonunun tepe yaptığı frekans değerlerine "doğal frekans", bu frekansta yapının titreşim biçimlerine de "mod şekli" denmektedir. Bir sistemin herhangi bir fiziksel girdiye vereceği yanıt, sistemin mod şekillerinin üst üste konulmasından (süperpozisyon) oluşmaktadır [7]. Dolayısıyla fiziksel bir sistemin dinamik karakterinin doğrulanması, doğal frekans ve mod şekilleri kullanılarak sağlanabilmektedir.



**Şekil 4.** Çok Serbestlik Dereceli Sistemin İvme/Kuvvet Frekans Yanıt Fonksiyonu

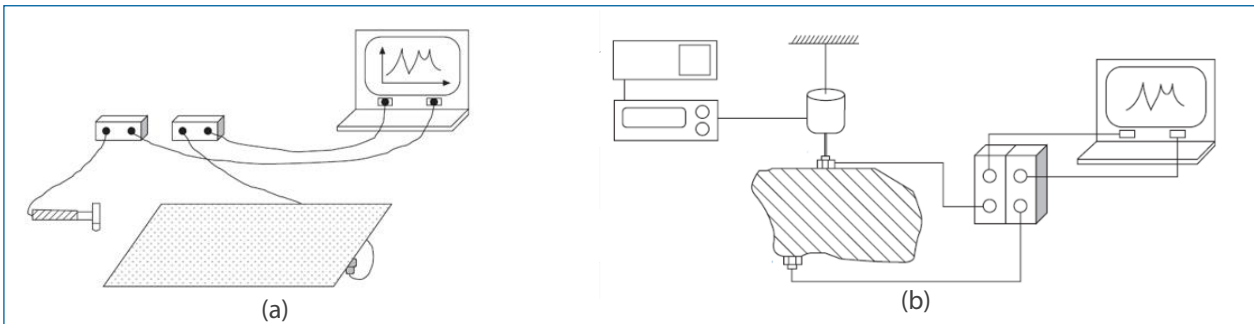
Mühendislik yapılarında sonlu elemanlar ortamında yapılan modal analiz çalışmaları ile dinamik karakter hakkında bilgi edinilebilir. Sonlu elemanlar modal analizleri ile yapının dinamik karakterini açıklayan doğal frekans ve mod şekilleri de hesaplanabilmektedir. Bu bilgiler, kurulan matematik modelin dinamik davranışının test yolu ile doğrulanmasında ve güncellenmesinde kullanılabilir. Bu karşılaştırma için "modal test" çalışması gerçekleştirilir. Modal test uygulaması, bilinen bir girdinin sağlanması ve sistem yanıtının ölçülmesini kapsar. Örnek modal test uygulaması Şekil 5'de sunulmuştur.

Bilinen girdi, modal çekiç ve modal sarsıcı ile yerel kuvvet/yer değiştirme uygulanması ile sağlanmaktadır. Modal çekiç ile uygulanan darbe, çekiç bünyesinde bulunan kuvvet sensörü ile ölçülmektedir. Modal sarsıcı uygulamalarında ise verilen girdi, sarsıcıya yerleştirilen "mekanik empedans sensörü" ile belirlenebilmektedir. Sistemin vereceği yanıtlar ivmeölçer ve titreşim ölçer (vibrometre) gibi sensörler ile hareket (yer değiştirme, hız, ivme) büyüklükleri cinsinden ölçülebilmektedir. Ölçümler yerel olarak alınıyor olsa da çoğunlukla sistemin bütünü

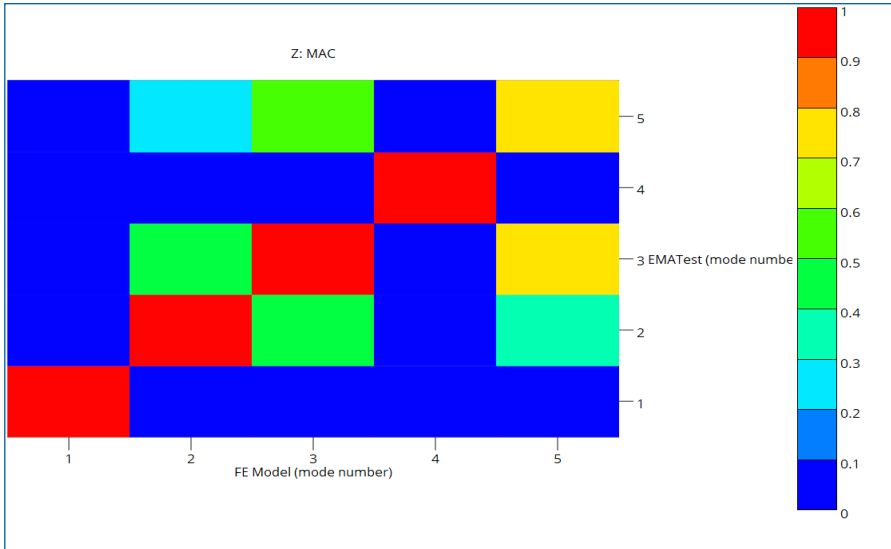
hakkında bilgi edinilebilir. Yapının ilk doğal frekansların (ve karşılık gelen mod şekillerinin) sistemin tamamında etkin olduğu, ilerleyen doğal frekansların ise yerleştiği genellemesi yapılabilmektedir. Dolayısıyla sistem bütünü etkileyen doğal frekansların saptanması çok duyarlı konumlandırılma yapılmadan da sağlanabilmektedir. Daha yüksek ve yerel etkin doğal frekansların belirlenmesi için ise ilgili mod şeklinde yüksek hareket beklenen konumlara sensör yerleştirilmesi doğru olacaktır. Yapı uygunsa sistem yanıtı gerinim ölçerler ile de ölçülebilir [8].

Sonlu elemanlar modal analizi ve modal test ile elde edilen doğal frekans değerleri veya mod şekilleri karşılaştırılarak doğrulama yapılabilir. Doğal frekans karşılaştırması görece kolay olup testle ölçülen ve analizle hesaplanan doğal frekans değerlerinin uyumu ile irdelenebilir. Yapının katılık özellikleri, bağlantı koşulları gibi fiziksel etmenler, gözlemlenen doğal frekans değerlerini doğrudan etkilemektedir. Alınacak tutarlı sonuçlar, sonlu elemanlar modelinin yapının fiziksel özelliklerini doğru bir şekilde yansıtabildiğini ve yapılacak farklı analizlerin tutarlı olabileceğini göstermektedir. Sonlu elemanlar analizlerine girdi olarak verilebilecek dinamik katılık ve sönüm değerleri de modal testler aracılığıyla hesaplanabilmektedir.

Mod şekillerinin karşılaştırmalı incelemeleri ile sonlu elemanlar analiz doğrulama çalışmaları bir adım daha ileri taşınabilir. Sonlu elemanlar ortamında hesaplanan mod şekilleri yapının bütünü kapsamaktadır. Modal test ölçümleri ise yapı üzerinde yalnızca ölçüm alınan konumların/noktaların davranışları hakkında bilgi verir. Dolayısıyla test yolu ile mod şekilleri hakkında bilgi edinmek için yapının davranışını doğru bir şekilde gözlemlemeye yetecek kadar konumdan frekans yanıt fonksiyonu ölçümlerinin alınması gerekmektedir.



**Şekil 5.** Modal Test Uygulaması, (a) Modal Çekiç, (b) Modal Sarsıcı [9]



**Şekil 6.** Modal Güvenilirlik Kıstası Hesabı, Düşey Eksen: Modal Analiz – Mod Şekilleri, Yatay Eksen: Modal Test – Mod Şekilleri, Sayfa Eksen: Uyum Katsayısı

Ölçüm alınan konumların doğal frekanslardaki yanıtlarının (örneğin yer değiştirme, ivme) birbirlerine göre (genlik, faz) durumlarından, yapının mod şekilleri belirlenebilmektedir. Mod şekillerinin karşılaştırılmasında “modal güvenilirlik kıstası” kullanılabilir [10]. Modal güvenilirlik kıstası, sonlu elemanlar ve test ortamında elde edilen mod şekillerinin benzerliğini sayısal olarak tanımlayabilen bir hesaptır. Modal güvenilirlik kıstası, sonlu elemanlar analizi ve test ile hesap edilen mod şekillerinin çift olarak vektörel çarpımı ve normalize edilmesi ile hesaplanır. Söz konusu işlem, analiz ve test ile elde edilen tüm mod şekli çiftleri (Test 1 – Analiz 1, Test 1 – Analiz 2...Test 2 – Analiz 1, Test 2 – Analiz 2...) için tamamlanır. Hesap sonucu, incelenen mod sayısı boyutunda bir kare matris halinde sunulur. Bu kare matris, karşılaştırılan mod şekli çiftlerinin uyumlarını niceleyen elemanlardan oluşmaktadır. Uyum katsayısı 0 kötü, 1 iyidir. Arzulanan çıktı, analiz ve deneysel yollar ile hesap edilen modların birbirleri ile yüksek, diğer modlar ile düşük uyum sergilemesidir.

## SONUÇ

Sonlu elemanlar analizleri mühendislik çalışmaları, mühendislik ürünlerinin prototipleme öncesinde ayrıntılı incelemelere ve geliştirmelere olanak sağlamaktadır. Ancak doğruluğu onaylanmamış sonlu elemanlar analizleri ile türetilen sonuçlar yanıltıcı çıktılara neden olabilmektedir. Bu durumun önlenmesi için sonlu elemanlar analizlerinin deneysel

yollarla doğrulama (validasyon) çalışmaları yapılmalıdır.

İlgilenilen yapının/sistemin ve analizlerle hesap edilen çıktının tiplerine göre farklı deneysel doğrulama uygulamaları bulunmaktadır. Doğru şekilde yapıldığında, deneysel doğrulama çalışmaları ile sonlu elemanlar analizleri doğrulanabilmekte veya doğru sonuçları türetecek şekilde güncellenebilmektedir.

## KAYNAKÇA

1. **Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C. ve Topp, L. J.** 1956. “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures”, *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 23, No. 9, pp. 805-823.
2. **Wu, T., You, D., Gao, H., Lian, P., Ma, W., Zhou, X., Wang, C., Luo, J., Zhang, H. ve Tan, H.** 2023. “Research Status and Development Trend of Piezoelectric Accelerometer”. *Crystals*, Vol. 13, No. 9, p. 1363.
3. **Ortiz, A. J. A. C., Cabrera, J. A., Guerra, A. J. ve Simon, A.** 2006. “An Easy Procedure to Determine Magic Formula Parameters: A Comparative Study Between the Starting Value Optimization Technique and the IMMA Optimization Algorithm”. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 44, No. 9, pp. 689-718.
4. **Micro-Measurements**, <https://micro-measurements.com/knowledge-base/application-notes>, son erişim tarihi: Ocak 2024.
5. **Jenkins, J. M., Kuhl, A. E. ve Carter, A. L.** 1977. “Strain Gage Calibration of a Complex Wing”, *Journal of Aircraft*, Vol. 14, No. 12, pp. 1192-1196.
6. **Nieminen, V., Tuohineva, A. ve Autio, M.** 2023. “Wheel Load Reconstruction Using Strain Gauge Measurements on the Bogie Frame for Strain Prediction and Fatigue Assessment”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 170, p. 107533.
7. **Turhan, Ö.** 2022. *Mekanik Titreşimler*, İkinci Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
8. **Santos, F. L. M. D., Peeters, B., Menchicchi, M., Lau, J., Gielen, L., Desmet, W. ve Góes, L. C. S.** 2014. “Strain-based Dynamic Measurements and Modal Testing”. *Topics in Modal Analysis II*, Vol. 8, pp. 233-242.
9. **Fu, Z. F. ve He, J.** 2001. *Modal Analysis*, Elsevier, Amsterdam.
10. **Allemang, R. J.** 2003. “The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse”. *Sound and Vibration*, Vol. 37 No. 8, pp.14-23.