



## Düzlem çerçeve modelinin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü

### Uncertainty quantification of damage detection results for a plane frame model

Umud Yücel<sup>1,\*</sup> , Erkan Durmazgezer<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye  
<sup>2</sup> Yaşar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, hasarın kolon ve kiriş uçlarında bölgesel rijitlik azalması olarak simüle edildiği, iki katlı, tek açıklıklı düzlem çerçeve modelinin duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemiyle elde edilen hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümüne yer verilmiştir. Kullanılan hasar tespit yöntemi, hasarlı ve hasarsız durumlara ait modal parametreler arasındaki farkların iteratif bir şekilde küçültülmesi esasına dayanmaktadır. Dinamik ölçümlerdeki gürültü varlığı, modal parametrelerin tahminini etkileyerek hasar tespit sonuçlarında belirsizliklere neden olmaktadır. Elde edilen sonuçların güvenilirliği, içerdikleri belirsizlik miktarının saptanması ile mümkündür. Sunulan çalışma kapsamında hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü, hasarlı duruma ait modal parametreler üzerine farklı varyasyon katsayıları ile ilişkili gürültü verisi eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Model güncelleme işlemi, hasarlı duruma ait gürültü verisi eklenmiş modal parametreler ile hasarsız durumun modal parametrelerinin kullanılması ve hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar modelinin eleman rijitlik değerlerinin güncellenmesi ile yapılmıştır. Güncelleme öncesi ve sonrası belirlenen rijitlik değerleri kullanılarak elemanlara ait rijitlik azalmaları hesaplanmış, böylece hasarların yerleri ve miktarları tespit edilmiştir. Farklı gürültü koşullarına ait verilerin kullanılması ile elde edilen hasar sonuçlarının belirsizlik ölçümü varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, hasar tespit sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturan etkenler belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hasar tespiti, Belirsizlik ölçümü, Varyans analizi, Meta-modelleme, Hassasiyet analizi

#### 1 Giriş

Mühendislik uygulamalarında, yapısal sistemlerin davranışlarının tahmininde ve tasarımında sayısal modellerin kullanımı oldukça yaygındır. İnşaat mühendisliğinde, çeşitli yapısal limit durumlarındaki sistemlerin iç kuvvetlerinin veya şekil değişimlerinin belirlenmesinde ve rüzgâr, trafik, deprem gibi dinamik etkiler altındaki titreşim tepkilerinin analizlerinde sonlu elemanlar modellerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Bu modeller, yapının bütününi tasarlamak için kullanılabilirliği

#### Abstract

In this study, uncertainty quantification was carried out on the damage detection results obtained through the sensitivity-based finite element model updating method for a two-story, single-span plane frame model, where damage was simulated as a regional stiffness reduction at the ends of columns and beams. The damage detection method employed is based on iteratively reducing the differences in modal parameters between damaged and undamaged conditions. The presence of noise in dynamic measurements introduces uncertainties in damage detection results by affecting the estimation of modal parameters. The reliability of the obtained results is possible by quantifying the amount of uncertainty they encompass. In the presented study, uncertainty quantification of damage detection results was carried out by adding noise data associated with different coefficient of variations to modal parameters related to the damaged condition. The model updating process was performed by using modal parameters with added noise data for the damaged condition and modal parameters for the undamaged condition, as well as by updating the element stiffness values of the finite element model representing the undamaged condition. Stiffness reductions of elements were calculated using the determined stiffness values before and after updating, thus enabling the detection of the location and extent of damage. Uncertainty quantification of the damage results obtained under different noise conditions was conducted using analysis of variance, meta-modeling, and sensitivity analysis methods. In this way, factors that introduce substantial uncertainty in damage detection results have been identified.

**Keywords:** Damage detection, Uncertainty quantification, Analysis of variance, Meta-modeling, Sensitivity analysis

gibi, yapının herhangi bir bileşenini temsil etmek üzere de oluşturulabilmektedir.

Sonlu elemanlar modelleri, yapısal sisteme veya onun bileşenlerine ait özelliklerin tahmininde, malzeme özellikleri, geometrik özellikler, yük durumları ve sınır şartları açısından çeşitli kabuller içerebilmektedir. Ayrıca, bilgi eksikliği ya da farklı kısıtlamalar nedeniyle de modelleme aşamasında varsayımların yapılması çoğu zaman kaçınılmaz olmaktadır. Bu gibi durumlar, oluşturulan sayısal modellerin gerçek yapısal sistem davranışını yansıtmaya

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: umut.yucel@nevsehir.edu.tr (U. Yücel)  
Geliş / Received: 15.09.2023 Kabul / Accepted: 15.11.2023 Yayınlanma / Published: 15.01.2024  
doi: 10.28948/ngumuh.1361253

anlamındaki kalitesini ve doğruluğunu olumsuz biçimde etkilemektedir. Modelleme aşamasında karşılaşılan problemlerin üstesinden gelebilmek için sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği kullanılabilir. Belirli bir çıktıyı üreten sonlu elemanlar modelinin parametrelerini tahmin etmek üzerine kurulu olan yöntem, optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı, çıktıların bilindiği ancak girdilerin bilinmediği tersine mühendislik uygulamaları olarak adlandırılmaktadır. Yöntem, sayısal modeldeki bilinmeyen ve/veya belirsiz model parametrelerin (kütle, elastisite modülü, kayma modülü, yay rijitliği, atalet momenti, mesnet koşulları, vb.), sistemin gerçek (ölçülebilir, deneysel) davranışını yansıtan modal parametrelere uyum gösterecek şekilde kalibre edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu kapsamda, sayısal modeldeki model parametrelerin güncellenerek, farklı durumlara ait (hasarsız veya hasarlı) modal parametreler arasındaki uyumsuzlukların minimize edildiği iteratif bir işlem adımı takip edilmektedir. Kalibre edilmiş sayısal model ile hasarlı durumu yansıtan deneysel verinin kullanılması ile hasar tespit uygulamaları da yapılabilmektedir [1-14].

Sonlu elemanlar modeli güncellemesi problemlerinde, modelleme ve deneysel veri belirsizliği olmak üzere iki tür belirsizlikten bahsetmek mümkündür. Modelleme aşamasındaki bilinmeyen geometrik özellikler, malzeme özellikleri, yük karakteristikleri, modellemede kullanılan basitleştirmeler ve kabuller (sınır koşulları, malzeme davranışı, fiziksel eşitlikler, vb.) modelleme belirsizliğinin kaynağını oluştururken; ölçüm hataları (veride gürültü varlığı, ölçüm sisteminin kusurları, sinyal işleme esnasında yapılan hatalar, vb.) ise deneysel veri belirsizliğinin en önemli nedenleridir. Ele alınan problemdeki belirsizlik varlığı (modelleme ve/veya deneysel veri belirsizliği), optimizasyon algoritmasının çözüme ulaşmasını ya da kararlılığını olumsuz bir biçimde etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, bu belirsizliklerin sonlu elemanlar modeli güncellemesi uygulamalarında uygun bir şekilde yönetime dâhil edilmesi ve elde edilen bulguların içerdikleri belirsizlikler ile birlikte değerlendirilmeleri önem taşımaktadır [8, 15-19].

Son yıllarda, model güncelleme, hasar tespiti ve yapı sağlığı izleme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde güvenilir sonuçlar elde edilmesine yönelik belirsizlik ölçümü çalışmalarına giderek daha fazla önem verilmektedir. Literatürde bu kapsamda yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Kernicky vd. [20] düzlemsel kafes sistemin artan hasar seviyeleri için hasar tespit çalışması gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemine uyarlamalar yapılarak ölçüm ve modelleme belirsizliği hesaba katılmıştır. Huang vd. [21] Bayes analizinin temel ilkelerini özetlemiştir. Çalışmada inşaat mühendisliği yapılarında Bayes yaklaşımı kullanmanın sistem tanımlama ve hasar tespiti anlamında daha güvenilir sonuçlar verdiğinin altı çizilmiştir. Silva vd. [22] tarafından yapılan çalışmada modal parametre tahminindeki belirsizliklerin daha doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntemin performansı sayısal örnekler ve deneysel çalışmalar ile ortaya konmuştur. Yin vd. [23] sıkça kullanılan duyarlılık

tabanlı deterministik yöntemi geliştirerek belirsizlik ölçümünde kullanılabilen yeni bir yöntem bulmuştur. Ölçüm gürültüsünün olasılıksal bilgisinin ve geçmiş dağılımının bilinmediği koşullarda bile belirsizliği hızlı bir şekilde belirleyebilen yöntem, modelleme hataları kaynaklı belirsizlikler için de kullanılabilir. Yöntemin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümündeki etkinliği sayısal örnekler ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Xie vd. [24] hasar tespiti ve belirsizlik ölçümü için daha az veri kümesi talebi olan daha verimli bir yaklaşım önermiştir. Yöntemin etkinliği, doğruluğu ve verimliliği sayısal çalışmaların yanında deneysel olarak da araştırılmıştır. Sillionis ve Anyfantis [25] model tahmin hatasının istatistiksel yapısını ve hasar tespiti üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada olasılıksal statik yüklemeye maruz kalan bir kiriş referans yapı olarak ve şekil değiştirme ölçümleri de hasara duyarlı parametreler olarak kullanılmıştır. Model tahmin hatası, mevcut laboratuvar gözlemleri ve nümerik veriler aracılığıyla hassas bir şekilde ölçülmüştür.

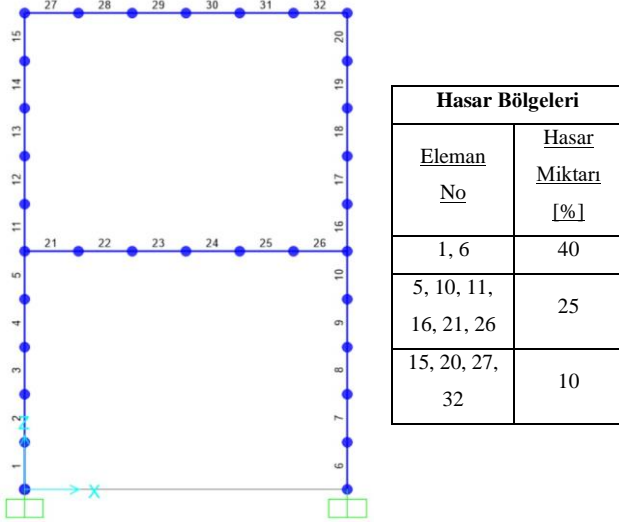
Sunulan çalışmada, hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümüne yer verilmiştir. Bu kapsamda, iki katlı, tek açıklıklı düzlem bir çerçeve modeli ele alınmıştır. Hasarlı çerçeve durumu kolon ve kiriş uçlarında bölgesel rijitlik azalması olarak simüle edilmiş, hasar tespiti için duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemi kullanılmıştır. Hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü, hasarlı durumu yansıtan modele ait modal parametreler üzerine dört farklı varyasyon katsayısıyla (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) ilişkili gürültü verisi eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar modelinin eleman rijitlik değerleri güncellenerek, hasarlı (gürültü verisi eklenmiş) ve hasarsız durumların modal parametreleri arasındaki farklar minimize edilmiştir. Bu kapsamda çerçeve modelinin ilk üç modu dikkate alınmıştır. Güncelleme öncesi ve sonrası belirlenen rijitlik değerleri kullanılarak elemanlara ait rijitlik azalmaları (hasar miktarları) hesaplanmış, böylece hasarların yerleri ve miktarları tespit edilmiştir. Farklı gürültü koşullarına ait verilerin kullanılması ile elde edilen hasar sonuçlarının belirsizlik ölçümü varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Sonlu elemanlar modeli, hasar senaryosu ve problem tanımı

Çalışmada kullanılan iki katlı, tek açıklıklı düzlem çerçevenin sonlu elemanlar modeli Şekil 1'de verilmiştir. Toplam 32 eleman ve 32 düğüm noktasından oluşan çerçevenin kat yüksekliği 3 m, kat açıklığı ise 4 m'dir. Kolon ve kirişler dikdörtgen kesitli olup, boyutları sırasıyla 0.60 x 0.30 m ve 0.60 x 0.25 m'dir. Kullanılan malzemenin elastisite modülü değeri 32 GPa olarak alınmış olup, modelin mesnet koşulları tam ankastre olacak şekilde kabul edilmiştir. Hasarlı durumu temsil etmek üzere modelde üç farklı hasar bölgesi belirlenmiştir (Şekil 1). Buna göre, 1. kat kolonlarının alt uçlarına (1 ve 6 numaralı elemanlar), 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerine (5, 10, 11, 16, 21 ve 26 numaralı elemanlar) ve 2. kat kolon-kiriş birleşim

bölgelerine (15, 20, 27 ve 32 numaralı elemanlar) sırasıyla %40, %25 ve %10 eğilme rijitliği azalmaları (hasar değerleri) tanımlanmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modeli

Hasar bölgelerine atanan hasarların tahmini, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde açıklanacak olan farklı gürültü senaryoları için, MATLAB [26] tabanlı FEDEASLab [27] ortamında programlanan duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, hasarsız ve hasarlı modellerin ilk üç moduna ait modal parametreler (titreşim frekansları ve modal deplasman vektörleri) kullanılmıştır. Modal deplasman vektörleri, Şekil 1'de gösterilen 30 adet serbest düğüm noktasının ötelenme serbestlik dereceleri kullanılarak oluşturulmuştur. Buna göre, ele alınan her bir mod için 3 doğrultu (düzlem içi, düzlem dışı ve düşey) x 30 serbest düğüm noktası = 90 modal deplasman bileşeni ve 1 adet titreşim frekansı değeri kullanılmıştır. Modelin hasarsız ve hasarlı durumlarına ait titreşim frekansı değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan model güncelleme yönteminin ve oluşturulan algoritmanın detayları, yazarların önceki çalışmalarında bulunmaktadır [28-30].

Tablo 1. Modelin hasarsız ve hasarlı durumlarına ait titreşim frekansı değerleri

Mod	Hasarsız Durum Frekansları [Hz]	Hasarlı Durum Frekansları [Hz]
1) Düzlem dışı	3.20	2.86
2) Burulma	8.68	7.94
3) Düzlem içi	14.27	12.61

Çalışmada, modal parametrelerdeki muhtemel tahmin hatalarına (belirsizliklere) bağlı olarak oluşan hasar tespit sonuçlarındaki belirsizliklerin araştırılması, hasarlı duruma ait modal parametrelere dört farklı seviyede varyasyon katsayısı (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) ile ilişkili gürültü verisi eklenerek gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen modal parametre girdi faktörleri (M1, M2 ve M3), seviyeleri ile birlikte Tablo 2'de özetlenmiştir. Örneğin; M1 girdi faktörü 1. moda ait modal parametrelerdeki belirsizliği

temsil etmekte olup, dört farklı belirsizlik seviyesine (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) sahiptir. Böylece, toplamda  $4^3 = 64$  (4 belirsizlik seviyesi, 3 dikkate alınan mod sayısı) farklı modal parametre girdi faktörü kombinasyonu elde edilmiştir. Her bir kombinasyon seti için ise, Gauss dağılımına uygun olacak şekilde 20 gürültü gerçekleştirilmesi (realizasyonu) üretilmiştir. Bir başka deyişle, 64 kombinasyonun her biri için, aynı karakteristiğe sahip olacak şekilde Gauss dağılımına uygun olarak 20 farklı gürültü verisi oluşturulmuştur. Sonuç olarak toplamda  $64 \times 20 = 1280$  farklı senaryo elde edilmiş olup, hasar tespit algoritmasının toplamda 1280 kez çalıştırılması sağlanmıştır.

Tablo 2. Modal parametre girdi faktörlerinin seviyeleri ile birlikte tanımları

Faktör	Tanım	Seviyeler
M1	1. moda ait modal parametrelerdeki belirsizlik	4 Seviye (%0.50, %1.00, %1.50, %2.00)
M2	2. moda ait modal parametrelerdeki belirsizlik	4 Seviye (%0.50, %1.00, %1.50, %2.00)
M3	3. moda ait modal parametrelerdeki belirsizlik	4 Seviye (%0.50, %1.00, %1.50, %2.00)

## 2.2 Model güncelleme ve belirsizlik ölçümü algoritmaları

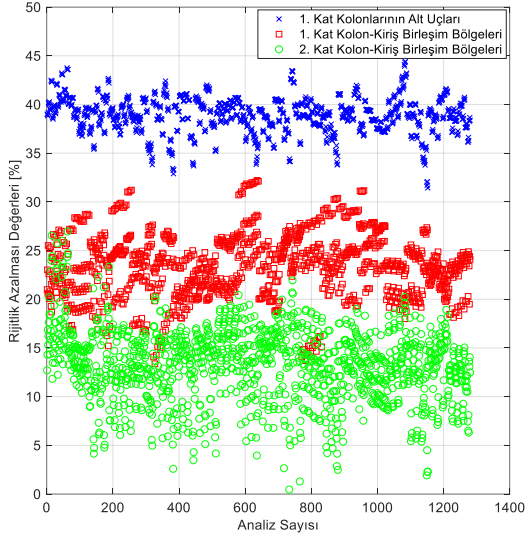
Kullanılan model güncelleme algoritmasında hasarsız ve hasarlı modellerin modal parametrelerinin farkları dikkate alınıp bir artık vektörü hesaplanır. Artık vektöründen oluşturulan amaç fonksiyonu ile doğrusal olmayan en küçük kareler (EKK) problemi tanımlanır. Artık vektörünün her bir bileşeninin eleman rijitlik ifadelerine göre hassasiyetleri (türevleri) hesaplanarak hassasiyet matrisi elde edilir. EKK probleminin minimizasyonu, artık vektörünün, amaç fonksiyonunun ve hassasiyet matrisinin bir optimizasyon algoritmasına dâhil edilmesiyle gerçekleştirilir. Sunulan çalışmada bu amaç için MATLAB'de yer alan "fmincon" komutu kullanılmıştır. Optimizasyon iteratif bir işlem olduğundan, her adımda yenilenen eleman rijitlik değerleri ile modal analiz tekrarlanır ve yeni bir artık vektörü, amaç fonksiyonu ve hassasiyet matrisi hesabı yapılır. Amaç fonksiyonunda yeteri kadar küçülme sağlanması ile model güncelleme işlemi tamamlanır ve nihai eleman rijitlikleri, dolayısıyla da hasar miktarları, hesaplanır.

Belirsizlik ölçümü için oluşturulan algoritma model güncelleme algoritmasından bağımsızdır. Farklı gürültü koşulları altında gerçekleştirilen model güncelleme çalışmalarının sonuçları belirsizlik ölçümü algoritmasının girdilerini oluşturmaktadır. Sunulan çalışmada, hasarlı durumu yansıtan modele ait modal parametrelere farklı nitelikte gürültü verisi eklenerek toplamda 1280 farklı model güncelleme problemi oluşturulmuştur. Buradan elde edilen 1280 hasar sonucu ise belirsizlik ölçümüne tabi tutulmuştur. Gauss dağılımına uygun gürültü verisi MATLAB'de "random" komutuyla üretilmiştir. Burada, ilgili modal parametre bileşeninin ortalama (titreşim frekansının kendisi, modal deplasman vektörü bileşenlerinin ortalaması) ve standart sapma (ortalama ve varyasyon katsayısının çarpımı) değerleri kullanılmıştır.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü

Önceki bölümde belirtildiği gibi, 1280 farklı durum için hasar tespit işlemi yapılmıştır. Elde edilen hasar tespit sonuçlarının (hasar bölgelerindeki rijitlik azalması değerlerinin) tamamı Şekil 2’de, 20 gürültü gerçekleştirilmesinin hasar sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilen 64 girdi faktörü kombinasyonunun ortalama ve standart sapma değerleri ise Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’te her bir daire 20 gürültü gerçekleştirilmesinin ortalamasını, kırmızı yatay çizgiler ise tüm verilerin ortalamasını temsil etmektedir. Sonuçlara ait istatistikî değerler de Tablo 3’te sunulmuştur.

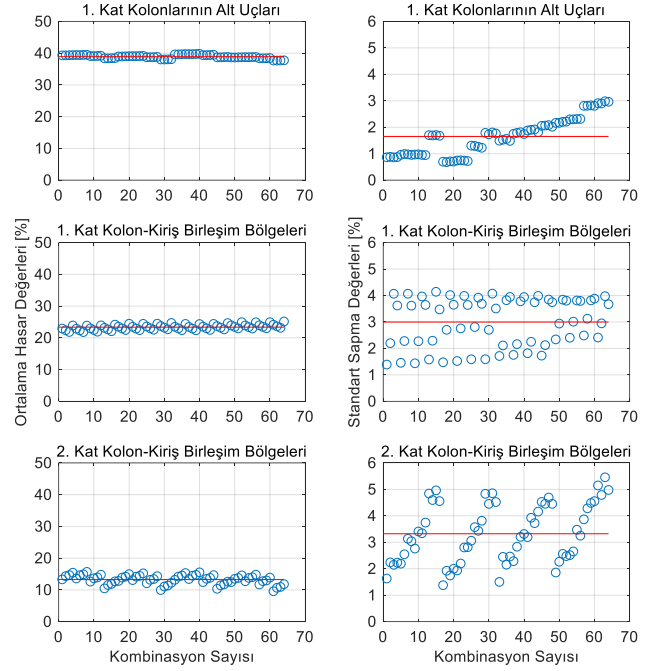


Şekil 2. Model güncelleme algoritmasının 1280 kez çalıştırılması ile elde edilen hasar tespit sonuçları (hasar bölgelerindeki rijitlik azalması değerleri)

Şekil 2-3 ve Tablo 3 incelenecek olursa, hasar tespit sonuçlarına ait ortalama değerlerin, her bir hasar bölgesi için tanımlanan gerçek hasar değerlerine yakın olduğu görülebilir. Standart sapma değerlerinin büyük olması, gerçek değerler etrafında saçılımın fazla oluşunun göstergesidir. Bu durum, optimizasyon probleminde kullanılan modal parametrelerin ilgili hasar bölgelerine daha az duyarlı olduğunu belirtmektedir. Bir başka deyişle, modal parametreler üzerindeki gürültü varlığı optimizasyon algoritmasının gerçek hasar değerine ulaşmasını zorlaştırmaktadır.

Şekil 2-3 ve Tablo 3, sonuçlar hakkında genel bir fikir verse de, hangi modal parametre girdi faktörünün (modal parametre üzerindeki gürültü verisinin) hangi hasar bölgesi üzerinde daha fazla (ya da daha az) etkili olduğu bilgisini sağlayamaz. Bir başka ifadeyle, bu bilgilerin tek başına kullanılması ile belirsizlik ölçümü yapılması mümkün değildir. Bu çalışma kapsamında, varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri kullanılarak hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü yapılmıştır [31-36]. Böylece, bağımsız değişkenlerin (M1, M2, M3) bağımlı değişkenler üzerindeki (hasar bölgelerindeki rijitlik azalmaları) etkileri ayrılaştırılmış

ve hangi modal parametreler üzerindeki gürültü varlığının hangi hasar bölgesi sonuçları üzerinde daha etkili olduğu saptanmıştır.



Şekil 3. 20 gürültü gerçekleştirilmesinin hasar sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilen 64 girdi faktörü kombinasyonunun ortalama ve standart sapma değerleri

Tablo 3. Model güncelleme algoritmasının 1280 kez çalıştırılması ile elde edilen hasar tespit sonuçlarının istatistikî değerlendirmesi

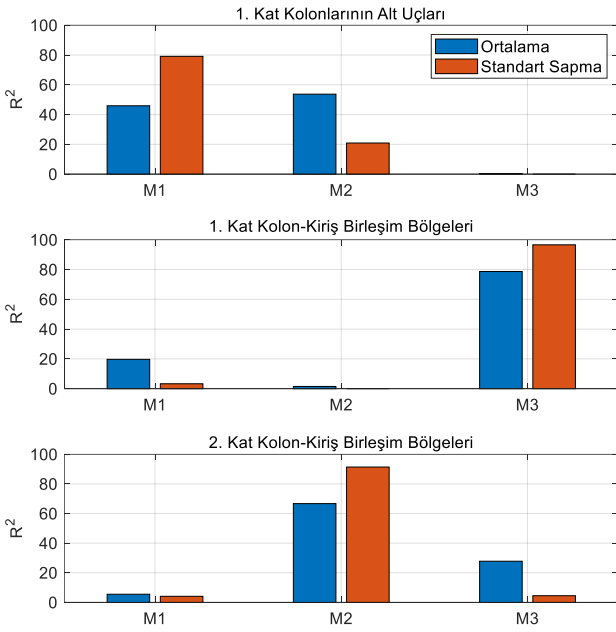
Hasar Bölgesi	Gerçek Hasar [%]	Ortalama Değer [%]	Standart Sapma [%]
1. kat kolonlarının alt uçları	40	39.9	1.7
1. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	25	23.4	3.0
2. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	10	13.3	3.3

#### 3.1.1 Varyans analizi çalışmaları

Şekil 3’teki veriler kullanılarak gerçekleştirilen varyans analizi çalışmalarının sonuçları Şekil 4’te sunulmuştur. Analizler MATLAB ortamında ‘‘anovan’’ komutu kullanılarak yapılmış olup, hesaplanan  $R^2$  değerleri her bir hasar bölgesi için toplamları 100 olacak şekilde normalize edilmiştir. Sonuçlarda  $R^2$  değerinin büyük olması, sözü geçen modal parametre girdi faktörünün, yani modal parametredeki gürültünün, ilgili hasar bölgesinin ortalama veya standart sapması üzerinde yarattığı belirsizlik etkisini büyük kılmaktadır. Bu durum, ilgili modal parametredeki gürültü varlığının hasar tespit sonuçları üzerinde etkili olarak belirsizlik oluşturduğunun göstergesidir. Şekil 4’e göre, düzlem dışı (M1) ve burulma (M2) modları üzerindeki gürültü varlığının, 1. kat kolonlarının alt uçları için hesaplanan hasar sonuçlarının ortalamaları ve standart sapmaları üzerinde önemli mertebede etkili olduğunu (büyük



$R^2$  değerleri) söylemek mümkündür. Bu, elde edilen hasar sonuçlarının güvenilirliğini sarsan bir durumdur. Benzer yaklaşımla, diğer hasar bölgelerinin sonuçları üzerinde önemli mertebede belirsizlik oluşturan modal parametre girdi faktörleri belirlenmiş ve Tablo 4'te özetlenmiştir. Buna göre; düzlem dışı modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M1) 1. kat kolonlarının alt uçlarında, burulma modunun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M2) 1. kat kolonlarının alt uçlarında ve 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, düzlem içi modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M3) ise 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar tespit sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturduğu söylenebilir.



Şekil 4. Varyans analizi çalışmalarının sonuçları

Tablo 4. Hasar bölgelerindeki yüksek belirsizlik etkenleri (varyans analizi)

Hasar Bölgesi	Yüksek Belirsizlik Etkeni
1. kat kolonlarının alt uçları	Düzlem Dışı (M1) Burulma (M2)
1. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	Düzlem İçi (M3)
2. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	Burulma (M2)

### 3.1.2 Meta-modelleme çalışmaları

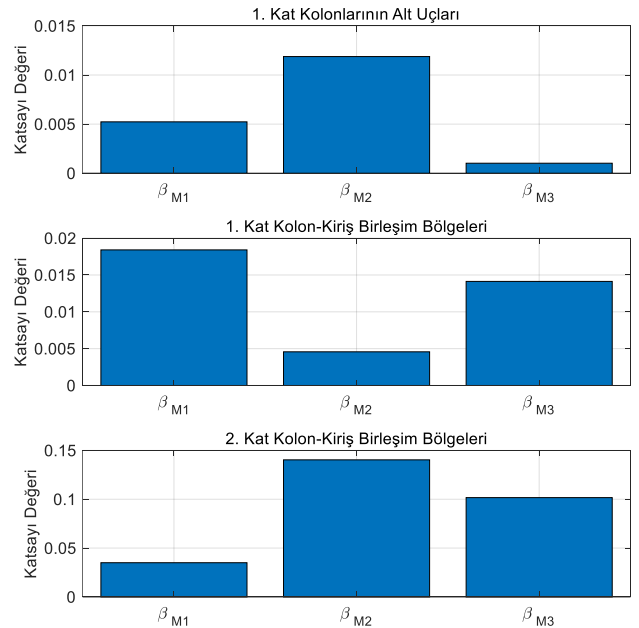
Meta-modelleri, sistemlerin girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiyi yansıtan yapılar olarak tanımlamak mümkündür. Meta-modelleme çalışmalarında, sistemlerin herhangi bir fiziksel karakteristiğine ihtiyaç duyulmaz, sadece sisteme ait girdi ve çıktı parametrelerinin bilinmesi yeterlidir. Meta-modeller, bu yönüyle kara-kutu modellere benzerlik gösterir ve uygulamada büyük kolaylıklar sağlamaktadır [31, 33].

Sunulan çalışmada, hasar bölgelerindeki hasar değerleri ve modal parametre girdi faktörleri ile birlikte Denklem (1)'de verilen doğrusal polinom model kullanılmıştır. Burada,  $Y$  hasar bölgesindeki ortalama hasar değerini,  $j$  hasar bölgesi indeksini (numarasını),  $M$  (M1, M2 ve M3) modal parametre girdi faktörlerini,  $\beta$  ( $\beta_{M1}$ ,  $\beta_{M2}$  ve  $\beta_{M3}$ ) ise

modal parametre girdi faktörleri ile ilişkili meta-model katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılarının belirlenmesi ile belirsizlik ölçümü tamamlanmış olmaktadır. Özel olarak,  $\beta_0$ 'ın tüm hasar sonuçlarının ortalama değerine eşit olduğunu belirtmekte fayda vardır. Meta-modelleme sonuçlarında  $\beta$  değerinin büyük olması, ilgili olduğu modal parametre girdi faktörünün belirsizlik etkisini büyük kılmaktadır.

$$Y^j = \beta_0^j + \beta_{M1}^j M1 + \beta_{M2}^j M2 + \beta_{M3}^j M3 \quad (1)$$

Denklem (1) kullanılırken modal parametre girdi faktörleri -1 (en küçük değere karşılık gelen) ve 1 (en büyük değere karşılık gelen) aralığında değer alacak şekilde ölçeklendirilmiş, hasar değerleri ise gerçek değerleri ile normalize edilerek boyutsuzlaştırılmıştır. Analizler MATLAB ortamında "fitlm" ve "regress" komutları kullanılarak iki farklı şekilde yapılmış ve aynı katsayı değerleri ( $\beta$ ) bulunmuştur. Elde edilen katsayıların mutlak değerleri alınarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Ayrıca,  $\beta_0$  değerlerinin de Tablo 3'te verilen ortalama değerler ile benzer olduğu gözlenmiştir. Şekil 5'in kullanılması ile hasar bölgelerinde önemli mertebede belirsizlik oluşturan modal parametre girdi faktörleri (büyük  $\beta$  değerine sahip olan) belirlenmiş ve Tablo 5'te özet olarak sunulmuştur. Buna göre; düzlem dışı modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M1) 1. kat kolonlarının alt uçlarında ve 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, burulma modunun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M2) 1. kat kolonlarının alt uçlarında ve 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, düzlem içi modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M3) ise 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ve 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar tespit sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturduğu sonucuna varılabilir.



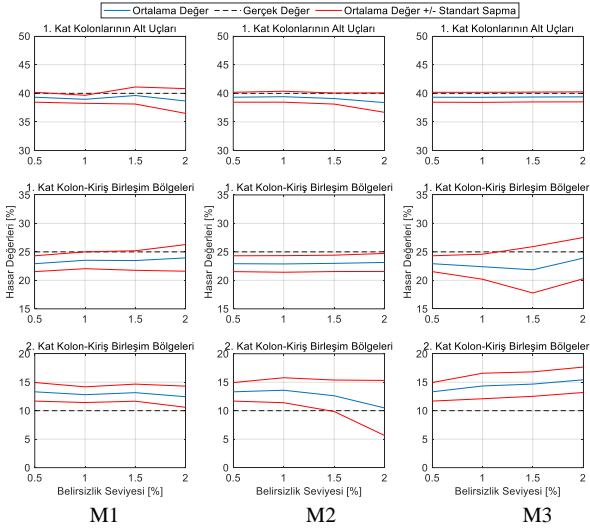
Şekil 5. Meta-modelleme çalışmalarının sonuçları

**Tablo 5.** Hasar bölgelerindeki yüksek belirsizlik etkenleri (meta-modelleme)

Hasar Bölgesi	Yüksek Belirsizlik Etkeni
1. kat kolonlarının alt uçları	Düzlem Dışı (M1) Burulma (M2)
1. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	Düzlem Dışı (M1) Düzlem İçi (M3)
2. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	Burulma (M2) Düzlem İçi (M3)

### 3.1.3 Hassasiyet analizi çalışmaları

Sunulan çalışmada, varyans analizi ve meta-modelleme çalışmalarının yanında, tespit edilen hasarların modal parametrelerdeki belirsizliğe (gürültü seviyesine) olan hassasiyetleri de araştırılmıştır. Bu kapsamda, sadece inceleme konusu olan girdi faktörünün belirsizlik seviyesi değiştirilmiş (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00), diğer girdi faktörleri ise en küçük belirsizlik seviyesinde (%0.50) sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da sunulmuş ve hasar bölgelerinin duyarlı olduğu modal parametre girdi faktörleri ise Tablo 6'da özetlenmiştir. Buna göre; 1. kat kolonlarının alt uçlarına ait hasar sonuçlarının modlardaki gürültü seviyelerine daha az duyarlı olduğu görülmektedir. 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinin hasar sonuçları düzlem içi modundaki gürültü seviyelerine (M3), 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki hasar sonuçları ise burulma ve düzlem içi modlardaki gürültü seviyelerine (M2 ve M3) daha fazla duyarlıdır. Buna ek olarak, elde edilen hasar sonuçlarının burulma ve düzlem içi modlardaki gürültü seviyelerine (M2 ve M3) daha fazla duyarlı olduğunu, düzlem dışı modundaki gürültü seviyelerine ise daha az duyarlı olduğunu söylemek mümkündür.



**Şekil 6.** Hassasiyet analizi çalışmalarının sonuçları

**Tablo 6.** Hasar bölgelerinin duyarlı olduğu modal parametre girdi faktörleri

Hasar Bölgesi	Yüksek Duyarlılık Etkeni
1. kat kolonlarının alt uçları	-
1. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	Düzlem İçi (M3)
2. kat kolon-kiriş birleşim bölgeleri	Burulma (M2) Düzlem İçi (M3)

Dikkat edilecek olursa, farklı yöntemler (varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi) kullanılarak gerçekleştirilen belirsizlik ölçümü çalışmaları tutarlı olmakla birlikte farklı sonuçlar da verebilmektedir (Tablo 4-6). Bunun nedeni, yöntemlerin probleme farklı açıdan yaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Şöyle ki; varyans analizinde bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığını belirler, meta-modellemede girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiler çoklu regresyon analizi ile matematiksel bir modele uydurulur, hassasiyet analizinde ise tek bir girdi faktörünün gürültü seviyesinin değiştirilmesi ile inceleme yapılır. Bu kapsamda önemli olan, farklı yöntemler ile elde edilen sonuçların değişkenlik gösterebileceğinin bilincinde olmak ve sonuçları kullanılan yonteme göre değerlendirmektir.

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada iki katlı, tek açıklıklı düzlem bir çerçeve modelinin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümüne yer verilmiştir. Hasarlı durumu temsil etmek üzere 1. kat kolonlarının alt uçlarına, 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerine ve 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerine sırasıyla %40, %25 ve %10 eğilme rijitliği azalmaları tanımlanmış, bu hasarların tespiti için ise duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen hasar sonuçlarının belirsizlik ölçümü, hasarlı durumu yansıtan modele ait ilk üç modun modal parametreleri üzerine dört farklı varyasyon katsayısıyla (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) ilişkili gürültü verisi eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Böylece, toplamda 64 farklı belirsizlik kombinasyonu oluşturulmuştur. Her bir kombinasyon seti için ise, Gauss dağılımına uygun olacak şekilde 20 farklı gürültü gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, toplamda 1280 farklı durum elde edilmiş olup, hasar tespit işlemi 1280 kez tekrarlanmıştır. Farklı gürültü koşullarına ait hasar sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi yapılmış; varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri ile de sonuçların belirsizlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, belirli modlardaki gürültü etkilerinin yalnızca belirli hasar sonuçları üzerinde etkili olduğu gösterilmiş ve hasar sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturan modlar belirlenmiştir. Şöyle ki:

- Varyans analizi çalışmalarının sonuçlarına göre;
  - (i) 1. kat kolonlarının alt uçlarında elde edilen hasar sonuçlarında düzlem dışı ve burulma modlarının,
  - (ii) 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında düzlem içi modunun,
  - (iii) 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında burulma modunun gürültüye bağlı olarak etkilenmesi önemli mertebede belirsizlik oluşturmaktadır.
- Meta-modelleme çalışmalarının sonuçlarına göre;
  - (i) 1. kat kolonlarının alt uçlarında elde edilen hasar sonuçlarında düzlem dışı ve burulma modlarının,
  - (ii) 1. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında düzlem dışı ve düzlem içi modlarının,
  - (iii) 2. kat kolon-kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında burulma ve düzlem içi modlarının

gürültüye bağlı olarak etkilenmesi önemli mertebede belirsizlik oluşturmaktadır.

– Hassasiyet analizi çalışmalarının sonuçlarına göre;

(i) 1. kat kolonlarının alt uçlarında elde edilen hasar sonuçları modlardaki gürültü seviyelerine daha az duyarlıdır.

(ii) 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçları düzlem içi modundaki,

(iii) 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçları burulma ve düzlem içi modlardaki gürültü seviyelerine daha fazla duyarlıdır.

(iv) Elde edilen hasar sonuçları burulma ve düzlem içi modlardaki gürültü seviyelerine daha fazla duyarlı olup, düzlem dışı modundaki gürültü seviyelerine daha az duyarlıdır.

Sunulan çalışmada ele alınan belirsizlik ölçümü yaklaşımı, elde edilen hasar tespit sonuçlarının içerdikleri belirsizliklerin saptanabilmesini sağlar. Böylece, sonuçların ne kadar güvenilir olduklarına karar verilebilir. Özellikle yapı sağlığı izleme alanında güvenilir sonuçların elde edilmesi, gelecekte yapılması planlanan çalışma ve analizler açısından son derece önemlidir. Yaklaşım yapı tipinden, ölçeğinden, yükleme koşullarından ve yapıda meydana gelen hasar mekanizmalarından bağımsızdır. Bu sebeple de, farklı türden mühendislik yapıları üzerinde gerçekleştirilen hasar tespiti çalışmalarının sonuçlarının belirsizlik ölçümü için kullanılmasının önünde herhangi bir engel bulunmamaktadır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %6

#### Kaynaklar

- [1] M. I. Friswell and J. E. Mottershead, Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 1995.
- [2] J. Nocedal and S. J. Wright, Numerical Optimization. Springer, New York, 1999.
- [3] A. Teughels, Inverse modelling of civil engineering structures based on operational modal data. Ph.D. Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium, 2003.
- [4] H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, D. W. Stinemates, B. R. Nadler, and J. J. Czarnecki, A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA, Technical Report LA-13976-MS, 2003.
- [5] A. Teughels and G. De Roeck, Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. Journal of Sound and Vibration, 278 (3), 589-610, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.10.041>
- [6] E. P. Carden and P. Fanning, Vibration based condition monitoring: a review. Structural Health Monitoring, 3 (4), 355-377, 2004. <https://doi.org/10.1177/1475921704047500>
- [7] J. M. Brownjohn, Structural health monitoring of civil infrastructure. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365 (1851), 589-622, 2007. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1925>
- [8] B. Moaveni, J. P. Conte, and F. M. Hemez, Uncertainty and sensitivity analysis of damage identification results obtained using finite element model updating. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 24 (5), 320-334, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00589.x>
- [9] C. Boller, F. K. Chang, and Y. Fujino, Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Wiley, West Sussex, 2009.
- [10] T. Marwala, Finite Element Model Updating Using Computational Intelligence Techniques: Applications to Structural Dynamics. Springer, London, 2010.
- [11] J. E. Mottershead, M. Link, and M. I. Friswell, The sensitivity method in finite element model updating: a tutorial. Mechanical Systems and Signal Processing, 25 (7), 2275-2296, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.10.012>
- [12] W. Fan and P. Qiao, Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. Structural Health Monitoring, 10 (1), 83-111, 2011. <https://doi.org/10.1177/1475921710365419>
- [13] E. Simoen, B. Moaveni, J. P. Conte, and G. Lombaert, Uncertainty quantification in the assessment of progressive damage in a 7-story full-scale building slice. Journal of Engineering Mechanics, 139 (12), 1818-1830, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.19437889.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.19437889.0000610)
- [14] A. Nozari, I. Behmanesh, S. Yousefianmoghadam, B. Moaveni, and A. Stavridis, Effects of variability in ambient vibration data on model updating and damage identification of a 10-story building. Engineering Structures, 151, 540-553, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.044>
- [15] M. C. Kennedy and A. O'Hagan, Bayesian calibration of computer models. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 63 (3), 425-464, 2001. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00294>
- [16] W. E. Walker, P. Harremoës, J. Rotmans, J. P. Van Der Sluijs, M. B. Van Asselt, P. Janssen, and M. P. Krayen von Krauss, Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. Integrated assessment, 4 (1), 5-17, 2003. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>
- [17] A. Der Kiureghian and O. Ditlevsen, Aleatory or epistemic? Does it matter?. Structural Safety, 31 (2), 105-112, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>
- [18] C. Soize, Generalized probabilistic approach of uncertainties in computational dynamics using random matrices and polynomial chaos decompositions. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 81 (8), 939-970, 2010. <https://doi.org/10.1002/nme.2712>
- [19] E. Simoen, G. De Roeck, and G. Lombaert, Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: a review. Mechanical Systems and Signal Processing, 56-57, 123-149, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.11.001>

- [20] T. Kernicky, M. Whelan, and E. Al-Shaer, Vibration-based damage detection with uncertainty quantification by structural identification using nonlinear constraint satisfaction with interval arithmetic. *Structural Health Monitoring*, 18 (5-6), 1569-1589, 2019. <https://doi.org/10.1177/1475921718806476>
- [21] Y. Huang, C. Shao, B. Wu, J. L. Beck, and H. Li, State-of-the-art review on Bayesian inference in structural system identification and damage assessment. *Advances in Structural Engineering*, 22 (6), 1329-1351, 2019. <https://doi.org/10.1177/1369433218811540>
- [22] E. Silva, C. Magluta, N. Roitman, and L. Aragoa Filho, Development of a structural identification methodology with uncertainty quantification through the SSI and bootstrap techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, 108290, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108290>
- [23] Z. Yin, Z. R. Lu, J. Liu, and L. Wang, Quantifying uncertainty for structural damage identification in the presence of model errors from a deterministic sensitivity-based regime. *Engineering Structures*, 267, 114685, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114685>
- [24] D. Xie, Z. R. Lu, G. Li, J. Liu, and L. Wang, Efficient Laplace prior-based sparse Bayesian learning for structural damage identification and uncertainty quantification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 188, 110000, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.110000>
- [25] N. E. Silionis and K. N. Anyfantis, Data-driven probabilistic quantification and assessment of the prediction error model in damage detection applications. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 71, 103412, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103412>
- [26] MATLAB. The MathWorks Inc., Massachusetts, USA, 2023.
- [27] F. C. Filippou and M. Constantinides, FEDEASLab getting started guide and simulation examples. <http://www.neesgrid.org/news/documents.php>, Accessed 31 August 2004.
- [28] E. Durmazgezer, Modal parameter estimation and damage identification on progressively damaged r/c frames. Ph.D. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey, 2019.
- [29] E. Durmazgezer, U. Yucel, and O. Ozcelik, Damage identification of a reinforced concrete frame at increasing damage levels by sensitivity-based finite element model updating. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17 (11), 6041-6060, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00690-5>
- [30] U. Yucel, Finite element model updating and damage identification of reinforced concrete frames with different infills and unreinforced masonry walls. Ph.D. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey, 2020.
- [31] R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology*. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [32] A. Saltelli, K. Chan, and E. M. Scott, *Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [33] C. F. J. Wu and M. Hamada, *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [34] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2006
- [35] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley and Sons, New York, 2007.
- [36] W. C. Navidi, *Statistics for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill, Boston, 2007.

