



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ  
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

## YAPI SAĞLIĞI İZLEME VERİLERİ İLE HASAR TESPİTİNDE KULLANILAN HASAR MODELLERİNİN BULANIK ANALİZ İLE BELİRSİZLİK AÇISINDAN İNCELENMESİ

Yıldırım Serhat Erdoğan<sup>1</sup> ve Pelin Gundes Bakir<sup>2</sup>

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469, İstanbul, Türkiye,

### SUMMARY

Structural identification and damage detection using structural health monitoring data has gained considerable attention in the last two decades. The models improved using in-situ measurements are very useful to predict the current damage condition of the structures. Many different damage models might be used to model the crack type damage in structural components. However the models which do not come up with additional computational burden are preferable since the structural damage detection is an inverse problem which is a computationally expensive method. In this study, three crack models for beam type elements are compared in terms of the modeling uncertainty amounts. The modeling uncertainties are quantified by the so-called Fuzzy Finite Element Model Updating method. In this method, uncertainties in both updating model parameters and the response quantities are modeled by means of fuzzy numbers. The natural frequencies and the mode shapes obtained from the simulated damaged cantilever beam are used in the updating process. The results shows that the uniform degradation of the flexural rigidity model which is the simplest damage model can effectively be used to model the damage in beam elements. Despite the fact that the fracture mechanic approach and the Christides and Barr models are more accurate but computationally expensive, they do not provide results which do not considerably differ from the results obtained by the use of uniform degradation model. Hence, it can be said that the uniform degradation of the flexural rigidity model might be preferred for modeling the damage in damage detection applications using structural health monitoring data.

### ÖZET

Son yıllarda yapı sağlığı izleme verileri kullanılarak yapısal tanılama oldukça önem kazanmıştır. Yapısal tanılama, operasyon ve çevre yükleri altında elde edilen veriler ışığında mevcut yapıları daha iyi temsil eden modeller geliştirme alanıdır. Bu modeller, başlangıç bir sayısal modeli ile deneysel veriler arasındaki farkın minimize edilerek belirsiz model

---

<sup>1</sup> yserdogan@itu.edu.tr

<sup>2</sup> gundesbakir@yahoo.com

parametrelerinin tahmini ile elde edilmektedir. Problemin çıktılarından model parametrelerinin tahmini mekanikte ters problem olarak bilinmekte ve çözümü optimizasyon algoritmaları ile mümkün olmaktadır. Ayrıca, yapılardan elde edilen ve mevcut durum hakkında bilgi içeren her türlü dinamik ve statik veri belirli şartlar altında yerel hasarın yerinin ve şiddetinin tespiti için de kullanılabilir. Bu noktada taşıyıcı elemanlardaki hasar, farklı hasar modelleri ile temsil edilebilir. Elde edilen sonuçların kesinliği ve doğruluğu hasar modeliyle doğrudan alakalıdır. Bundan dolayı bu çalışmada basit bir yapı sistemi için farklı hasar modellerinin hasar tespitindeki performansı, modellemedeki belirsizlikler göz önüne alınarak araştırılmıştır. Belirsizlik modellemesi ve analizinde bulanık sayılar ve bulanık aritmetik yöntemleri kullanılmıştır. Hasar modellerine ait parametreler ve yapı çıktılarındaki (doğal frekanslar, mod şekilleri v.b.) belirsizlikler bulanık sayılar ile modellenerek nicel belirsizlik miktarları elde edilmiştir. Hasar modellerinden elde edilen belirsizlik miktarları modelin, mevcut yapıdaki durumu belirli bir güvenilirlik seviyesinde yansıtması açısından önemlidir. Bu çalışma karmaşık hasar modellerinin hasar tespitindeki performansı incelendiği sonuçlar, düzgün yerel rijitlik azalması ve ayrık yay modelleri gibi basit modeller ile hasarın yerinin ve şiddetinin yeterli yakınsaklıkla tespit edilebileceğini göstermiştir. Karmaşık ve detaylı matematik modellerin davranışı daha iyi temsil etmesine rağmen bu durum genellikle belirli yüklem şartları veya çevre etkileri için geçerli olmaktadır. Bundan dolayı daha basit stokastik modeller ve deneysel veriler yardımıyla mevcut hasar durumunun tespiti daha makul olmaktadır.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda yapı sağlığı izleme verileri ile mühendislik yapıları için yapısal tanılama ve hasar tespiti oldukça önem kazanmıştır ([1]). Yapıların matematik modelleri, çeşitli çevre etkilerinin hesaba katılmamasından ve malzemenin karmaşık davranışından ve bunlara bağlı yapılan kabullerden dolayı gerçek davranışı tam olarak yansıtamamaktadır. Bundan dolayı, mevcut yapıdan toplanan veriler yapının gerçek davranışını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bu veriler yardımı ile yapının tam olarak bilinmeyen model parametreleri güncellenerek davranışın daha iyi tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Bu çerçevede sonlu eleman modeli güncellemesi (SEMG), sahadan toplanan verileri kullanarak malzeme özellikleri, sınır ve süreklilik koşulları gibi belirsiz parametrelerin güncellenmesinde sıkça kullanılmaktadır ([2],[3]). Bununla birlikte, SEMG ile mevcut yapılarda, deprem v.s gibi etkilerden meydana gelen hasarın tespiti de mümkün olmaktadır ([4]).

Yapısal tanılama ve hasar tespitinde çevre etkileri ve modellemeden dolayı birçok belirsizlik mevcuttur. Belirsizliklerin kaynağı temel olarak sıcaklık, nem gibi modellemeye katılmayan fiziksel büyüklükler olabileceği gibi, üretimdeki insan hataları, sensörlerden gelen hatalar, veri azlığı ve modellemedeki kabullerde olabilmektedir. Bu belirsizliklerin nicelendirilmesi güncellenen modelin kesinliğinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Belirsizlik nicelendirilmesinde genel olarak olasılık tabanlı ve olasılık tabanlı olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Olasılık tabanlı yöntemlerden Monte Carlo Simülasyonu, pertürbasyon yöntemleri, maksimum olasılık yöntemi ve Bayesian yöntemi öne çıkan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin SEMG'deki uygulamaları [5], [6] ve [7]'de bulunabilir. Bu çalışmada da kullanılan olasılık tabanlı olmayan yöntemlerden bulanık aritmetikte ise model parametreleri çeşitli üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık sayılar ile modellenmektedir ([8]). Bu yöntemin sonlu eleman modeli güncellemesine uygulamaları [9] ve [10]'da mevcuttur.

Bu çalışmada yapı sağlığı izleme verileri ile hasar tespitinde kullanılabilinecek çeşitli hasar modellerinin performansı modellenmeden kaynaklanan belirsizlik açısından incelenmiştir. Kirşi rijitliğinde düzgün değişim, Christides ve Barr modeli ile deneye dayalı gerilme yoğunluk faktörlerinin kullanıldığı hasar mekaniği modeli olmak üzere üç farklı model kullanılmıştır. Çatlak modellerinin performansı deneysel verilerin simülasyon olarak elde edildiği konsol kiriş için karşılaştırılmıştır. Simülasyon verileri düzlem gerilme elemanları ile sık bir sonlu eleman ağı kullanılarak elde edilmiştir. Bulanık sonlu eleman yöntemi ile her modele ait bulanık parametreler elde edilmiş ve belirsizlik miktarları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çok basit bir model olan eğilme rijitliğindeki düzgün değişim modeli ile daha detaylı olan Christides ve Barr ile hasar mekaniği modelleri arasında dikkate değer bir fark gözlemlenmemiştir. Böylece karmaşık (serbestlik değeri yüksek v.b) yapılar için hasarın, daha detaylı modeller ile modellenmesi yerine, hesaplama zamanı ve yükü açısından daha avantajlı, rijitlikte düzgün azalmaya dayalı modeller ile temsil edilmesi daha uygun olduğu söylenebilir.

## 2. BULANIK SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEMESİ

Bulanık sonlu eleman modeli güncellemesinde (BSEMG) deterministik yöntemden farklı olarak tüm model ve çıktı parametreleri bulanık sayılarla modellenmektedir. Bu noktada, bulanık sayıların şekli belirsizliklerin çeşidine bağlı olarak uzman görüş veya mühendislik tecrübelerine bağlı olarak belirlenebilir. Bu çalışmada hesaplamadaki kolaylık açısından üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. BSEMG'nin formülasyonunda  $\alpha$ -seviyesi gösterimi kullanılmıştır. Bulanık sayılar çeşitli  $\alpha$ -seviyelerinden kesilerek aralık sayılarına dönüştürülmüştür. Amaç fonksiyonu, aralık sayılarına dönüştürülen sayısal ve deneysel her çıktı parametresinin alt ve üst sınırlarının arasındaki farkın minimum olma prensibi göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Burada şu belirtilmelidir ki deterministik SEMG, BSEMG'de  $\alpha$ -seviyesi 1'e karşı gelmektedir. BSEMG için amaç fonksiyonu Denklem 1-5'de verilmiştir.

$$\min f(\theta^{int}) - \underline{r}(\theta^{int})^T W \underline{r}(\theta^{int}) + \overline{r}(\theta^{int})^T W \overline{r}(\theta^{int}) \quad (1)$$

$$\theta^{int} = [\underline{\theta}, \overline{\theta}] \quad (2)$$

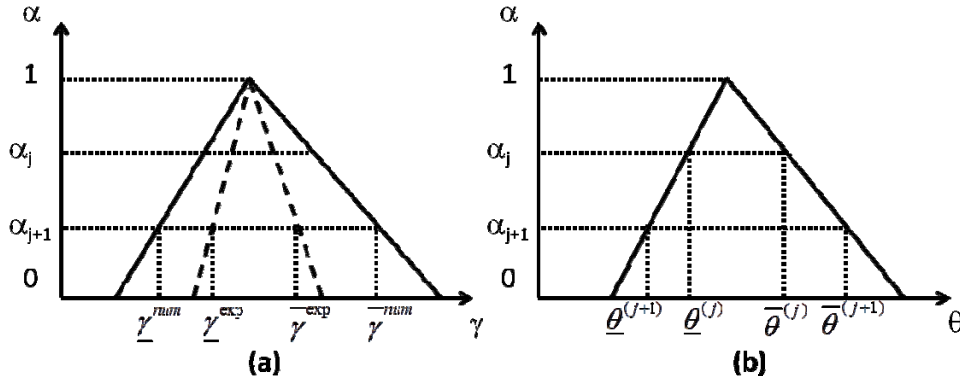
$$\underline{r}(\theta^{int}) = \frac{r(\theta^{int}) - r^s}{r^s} \quad (3)$$

$$\overline{r}(\theta^{int}) = \frac{\overline{r}(\theta^{int}) - \overline{r}^s}{\overline{r}^s} \quad (4)$$

$$[\omega^{int}, \phi^{int}, s^{int}] = f^{model}(\theta^{int}) \quad (5)$$

Burada  $\theta^{int}$  aralık güncellenen parametre vektörü,  $W$  ölçülen verilerin kesinliği dikkate alınarak sezgisel olarak belirlenen ağırlık matrisi,  $r = [\omega, \phi, s]$  çıktı vektörü,  $f(\theta)$  amaç fonksiyonu,  $f^{model}(\theta)$ , sayısal çıktıların hesaplandığı model fonksiyonudur. Alt indis  $e$  deneysel verileri simgelemektedir. Denklem 5'de frekans, mod şekli ve şekil değiştirme vektörleri  $\omega$ ,  $\phi$  ve  $s$  ile gösterilmiştir. Model parametreleri ve çıktılardaki üst indis  $int$  bu parametrelerin aralık değerli olduğunu göstermektedir. Aralık değerli parametrelerin bulunması için Denklem 1'de amaç fonksiyonu her  $\alpha$ - seviyesi için minimize edilmektedir. Aralık değerli parametreler daha sonra birleştirilerek bulanık parametreler elde edilir. Şekil-

1’de model ve çıktı parametreleri için  $\alpha$ -seviye gösterimi verilmiştir. Parametreler üzerindeki ve altındaki çizgiler sırasıyla üst ve alt sınırları göstermektedir.



Şekil 1 Parametrelerin  $\alpha$ -seviye gösterimi a) çıktılar b) model parametreleri

Her zaman geçerli olmasa dahi bu çalışmada olduğu gibi statik ve dinamik çıktılarının model parametrelerinin monotonik fonksiyonu olması durumunda, aralık çıktılarının hesaplanması kolaylaşmaktadır. Çıktıların monotonikliği model parametrelerinin tanım aralığında ön bir analiz ile belirlenebilir. Bu durumda Hanss ([8]) tarafından önerilen dönüşüm yöntemi aralık SE analizi için kullanılabilir. Bulanık SEMG yönteminde Denklem 1-5’e ek olarak Denklem 6-9’da verilen kısıtlar da dikkate alınmalıdır.

$$\underline{\theta}_i^{(j+1)} \leq \underline{\theta}_i^{(j)} \quad \forall j \in [0,1] \quad (6)$$

$$\bar{\theta}_i^{(j+1)} \geq \bar{\theta}_i^{(j)} \quad \forall j \in [0,1] \quad (7)$$

$$\underline{\gamma}_k(\theta^{(j)}) \leq \underline{\gamma}_k^e \quad k = 1, \dots, nm \quad (8)$$

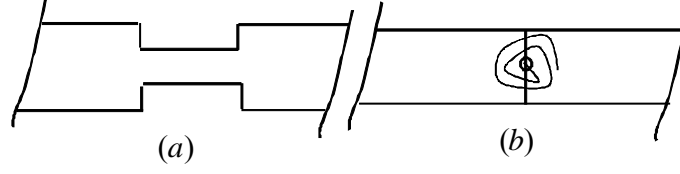
$$\bar{\gamma}_k(\theta^{(j)}) \geq \bar{\gamma}_k^e \quad k = 1, \dots, nm \quad (9)$$

### 3. Hasar Modelleri

Yapı mühendisliğinde karşılaşılan çatlaklar geometri ve davranış açısından çok karmaşık olabilmektedir. Çatlakların dinamik yüklemeler altında açılıp kapanma hareketinden dolayı rijitlik değişmesi ve çatlak civarında tarafsız eksenin yerinin değişmesi gibi durumlar mevcuttur. Fakat bu çalışmada, yapı sağlığı izlemesi uygulamalarında geçerli olan düşük frekanslı titreşim durumunda açık çatlak davranışı dikkate alınacaktır.

#### 3.1 Basit hasar modelleri

Yapı sağlığı izlemesinde çubuk elemanlar için kullanılan en basit hasar modelleri yay modeli ve rijitliğin eleman boyunca düzgün değişimini esas alan modellerdir. Bu tür modellerin kullanımı hesaplama ve modelleme açısından kolaylık sağladığından tercih edilmektedir. Yay modelleri hasar yeri değiştikçe farklı noktalara yay atamağı gerektirdiğinden kullanışlı değildir. Rijitlikte düzgün değişim modelinin dezavantajı ise daha sık bir sonlu eleman ağı gerektirmesidir. Fakat uygulamada en pratik yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil-2’de basit hasar modelleri verilmiştir.



Şekil 2 Basit hasar modelleri a) rijitlikte düzgün değişim b) yay modeli

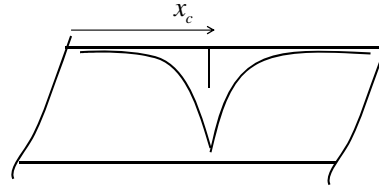
Basit hasar modellerinde rijitlikteki değişim rijitlikte düzgün değişim ve yay modelleri için sırasıyla Denklem 10 ve 11'de verilmiştir. Denklem (10) ve (11)'de  $EI$ , hasarlı elemanın rijitliği,  $EI$ , hasarsız elemanın eğilme rijitliği,  $\bar{k}_\phi$ , azaltılmış yay katsayısı,  $k$ , başlangıç yay katsayısı ve  $\theta$ , azaltma katsayılarıdır.

$$\bar{EI} = EI(1 - \theta) \quad (10)$$

$$\bar{k}_\phi = k(1 - \theta) \quad (11)$$

### 3.2 Christides ve Barr yaklaşımı

Çatlak civarında esneklikteki artış gerçekte çok karmaşık olabilmektedir. Bu durum, [11] yaklaşımında yerel esnekliğin çatlak civarındaki değişimi olarak ele alınmıştır. Bu değişim Şekil-3'de görüldüğü gibi çatlakın her iki tarafında rijitlik eksponansiyel biçimde azalmaktadır.



Şekil 3 Rijitliğin eksponansiyel değişimi

Dikdörtgen enkesitli çubuklarda çatlak civarında eğilme rijitliğinin değişimi Denklem 12'de verilmiştir. Denklem 12'de  $C = (I_o - I_c)/I_o$ ,  $x$ , kiriş eksen koordinatı,  $x_c$ , çatlak pozisyonu,  $I_o$  ve  $I_c$ , sırasıyla çatlama ve çatlama kesitin atalet momentidir. Denklemdeki  $\alpha$  sabiti ise deneyler elde edilmiş ve yaklaşık olarak 0.667 olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımın dezavantajı ise çatlak derinliğinin ve pozisyonunun değişmesine bağlı olarak, rijitlik matrisi elemanlarının sayısal entegrasyon ile hesaplanması gerekliliğidir. Bu durum hesaplama açısından ek yük getirmektedir.

$$\bar{EI} = \frac{EI}{1 + C \exp(-2\alpha|x - x_c|/d)} \quad (12)$$

### 3.3 Hasar Mekanik modeli

Hasar mekanik yaklaşımında çatlak civarındaki yerel rijitlikteki azalma ampirik gerilme yoğunluk faktörleri ile açıklanmaktadır. Euler-Bernoulli kirişi için çatlaksız durumdaki ve çatlaktan dolayı meydana gelen eğilme etkisi altında ek şekilde değiştirme enerjisi Denklem 13 ve 14'de verilmiştir.

$$U_0 = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M_x^2}{EI} dx \quad (13)$$

$$U_1 = b \int_0^a \{[(K_{IM} + K_{IP})^2 + K_{IIP}^2]/(E/(1 - \nu^2))\} da \quad (14)$$

Denklem 'deki gerilme yoğunluk faktörleri ise  $b \times h$  enkesitli, ucuna  $M$  ve  $T$  değerli iki kuvvetin etki ettiği konsol bir kiriş için [12]'de Denklem 15-17'deki gibi verilmiştir.

$$K_{IM} = \frac{6M}{bh^3} \sqrt{\pi a} \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi} \tan \frac{\pi s}{2} \frac{0.923 + 0.199[1 - \sin(\pi s/2)]^4}{\cos(\pi s/2)}}}{\cos(\pi s/2)} \quad (15)$$

$$K_{IP} = \frac{3Tb}{bh^3} \sqrt{\pi a} \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi} \tan \frac{\pi s}{2} \frac{0.923 + 0.199[1 - \sin(\pi s/2)]^4}{\cos(\pi s/2)}}}{\cos(\pi s/2)} \quad (16)$$

$$K_{IIP} = \frac{T}{bh} \sqrt{\pi a} (3s - 2s^2) \frac{1.122 - 0.561s + 0.086s^2 + 0.18s^3}{\sqrt{1-s}} \quad (17)$$

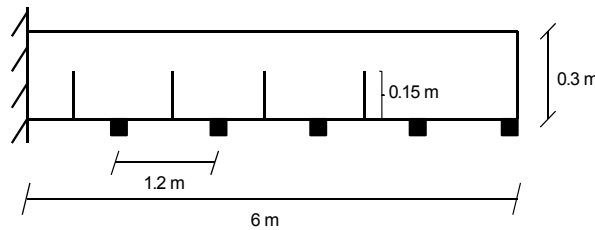
Denklemlerde  $s = a/h$ 'dir. Çatlamış ve çatlamamış kesitler için esneklik katsayıları Denklem 18 ve 19'dan elde edilebilir.

$$C_{ij}^0 = \frac{\partial^2 U_2}{\partial T_i \partial T_j}, T_i = T, T_j = M, \quad i, j = 1, 2. \quad (18)$$

$$C_{ij}^1 = \frac{\partial^2 U_1}{\partial T_i \partial T_j}, T_i = T, T_j = M, \quad i, j = 1, 2. \quad (19)$$

#### 4. SAYISAL UYGULAMA

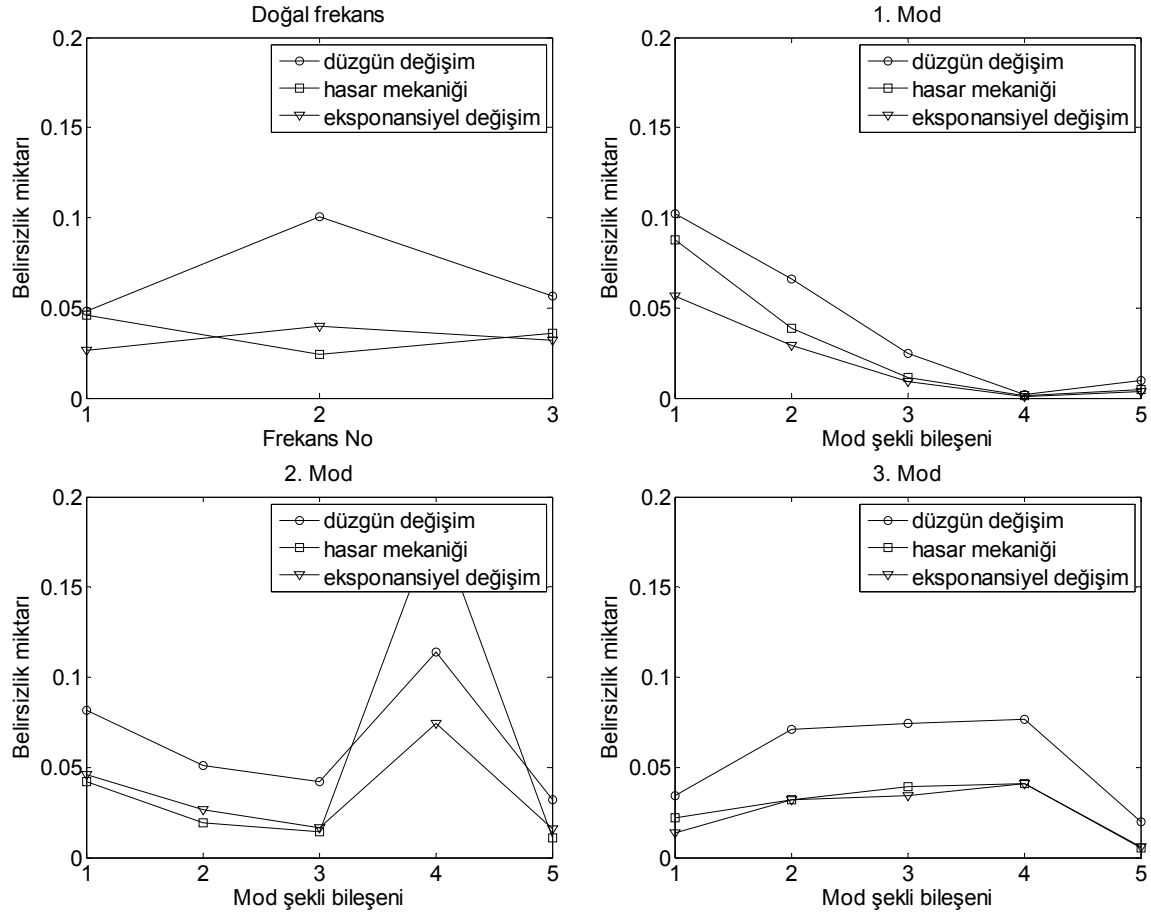
Önceki bölümde açıklanan çatlak modelleri Şekil-4'de geometrisi verilen ve kesit boyutları 0.25x0.30 m olan konsol kirişteki çatlak durumları için karşılaştırılmıştır. Kirişte 1.2 m aralıklarla derinliği 0.15 m olan 4 çatlak bulunmaktadır. Ayrıca kirişten 5 ivmeölçer ile veri toplandığı varsayılmıştır. İvmeölçerlerin yeri Şekil-4'de görülmektedir. Simülasyon (deneysel) verileri, düzlem gerilme elemanları ile sık bir sonlu eleman ağı kullanılarak elde edilmiştir. Güncellemede ilk üç doğal frekans ve mod şekli kullanılmıştır. Burada şu durum tekrar belirtilmelidir ki veriler, deneylerden değil de simülasyondan elde edildiğinden yalnızca modellemeden gelen hatalar ve belirsizlikler mevcuttur. Rijitliğin düzgün değişim modeli ve diğer iki model için güncellenen parametreler sırasıyla eğilme rijitliğinin ve çatlak yüksekliğinin yüzde olarak değişimi olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı güncellenen model parametrelerin değişim aralığı  $[0,1]$ 'dir.



Şekil 4 Kiriş geometrisi ve ölçüm noktaları

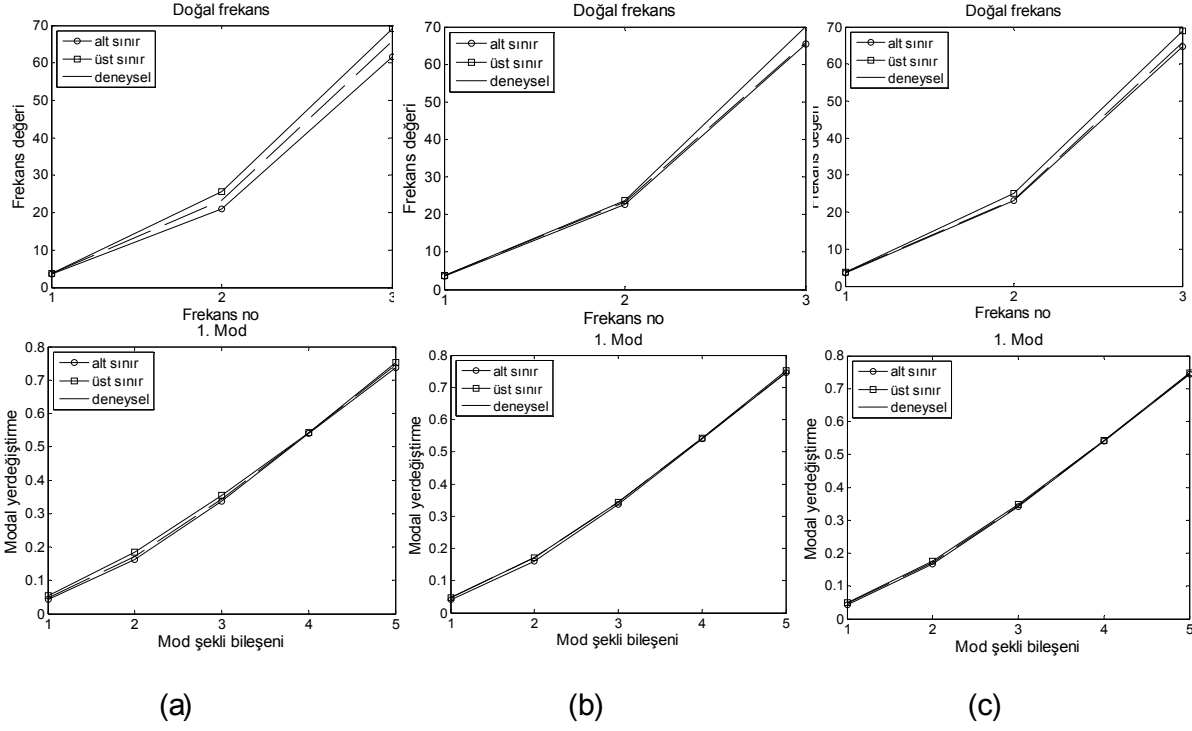
Her çatlak modeli için bulanık sonlu eleman modeli güncellemesi yönteminin uygulanması ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil-5'de tüm çatlak modelleri için doğal frekans ve mod şekillerindeki göreceli belirsizlik miktarları gösterilmektedir. Belirsizlik miktarları güncellenmiş bulanık çıktılarının alanlarının deterministik değerlerine ( $\alpha$ -seviyesi 1) oranı olarak hesaplanmaktadır. Görüldüğü üzere gerçek uygulamalarda çevre etkilerinden kaynaklanan belirsizliklerin olmamasında dolayı belirsizlik miktarları oldukça küçüktür. Bu

değerler bütün modeller için 0 - 0.1 aralığında değişmektedir. Daha yaklaşık bir model olan rijitliğin düzgün değişimi modelinde belirsizlik beklendiği gibi daha yüksektir. Exponansiyel değişim ve hasar mekaniği modelleri için belirsizlik miktarları yaklaşık olarak aynı seviyededir. Fakat tüm modeller arasında ciddi bir fark olmadığı görülmektedir.

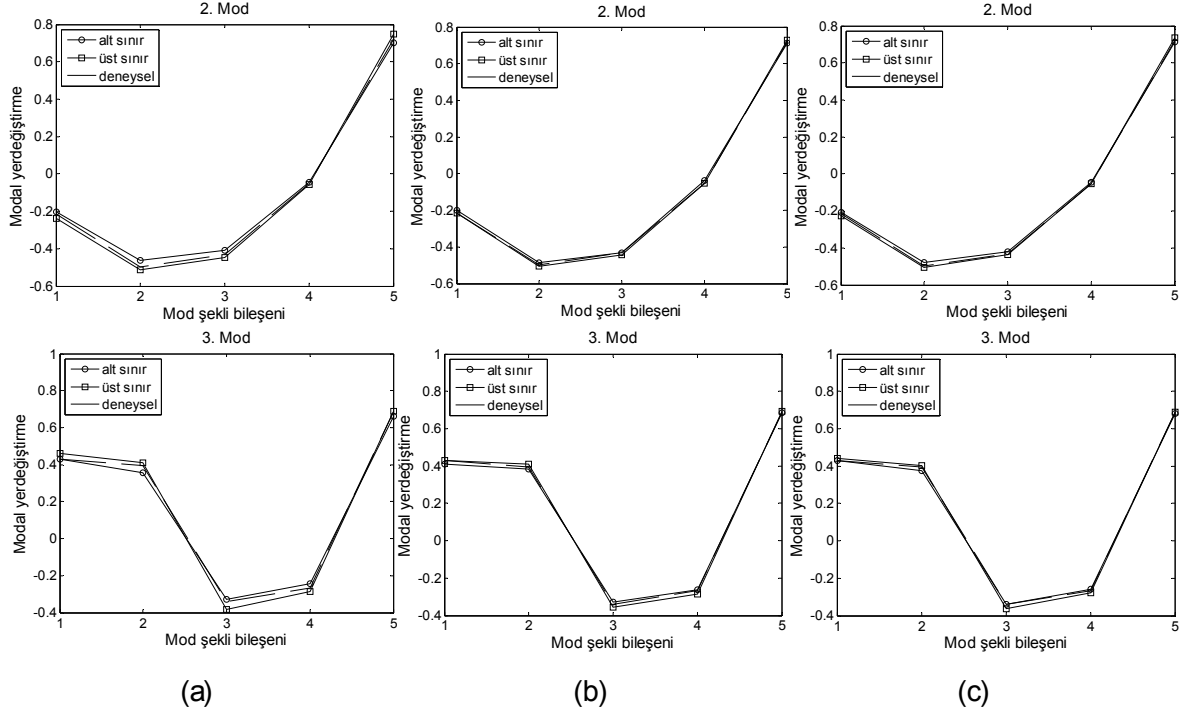


Şekil 5 Hasar modelleri için doğal frekans ve mod şekillerindeki belirsizlik miktarları

Şekil 6 ve 7'de doğal frekans ve mod şekillerinin  $0$   $\alpha$ -seviyesindeki aralık değerleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere bütün hasar modellerinde birinci doğal frekans için değişim aralığı oldukça dardır. Artan frekanslar için bu aralık genişlemektedir. Mod şekilleri içinde benzer durum söz konusu olmaktadır. Birinci mod şekli bileşenlerinin değişim aralığı daha küçüktür. Bunun nedeni davranış üzerinde düşük modların daha etkili olmaları ve dolayısıyla modellemedeki belirsizliklerden daha etkilenmeleridir. Görüldüğü üzere düzgün değişim modeli ile yapılan güncellemeden elde edilen çıktılarının değişim aralığı diğer iki modele göre daha geniştir. Özellikle yüksek modlar için bu fark artmaktadır. Fakat modeller arasında ciddi bir fark görülmemektedir. Belirsizliğin en fazla olduğu üçüncü doğal frekans dahi düzgün değişim modelinde 61-70 Hz arasında değişirken, hasar mekaniği ve exponansiyel değişim modelinde yaklaşık olarak 66 – 70 Hz aralığında değişmektedir.



Őekil 6 0  $\alpha$ -seviyesinde aralık deęerleri a) dűzgűn deęiřim b) hasar mekanięi c) eksponansiyel deęiřim modeli

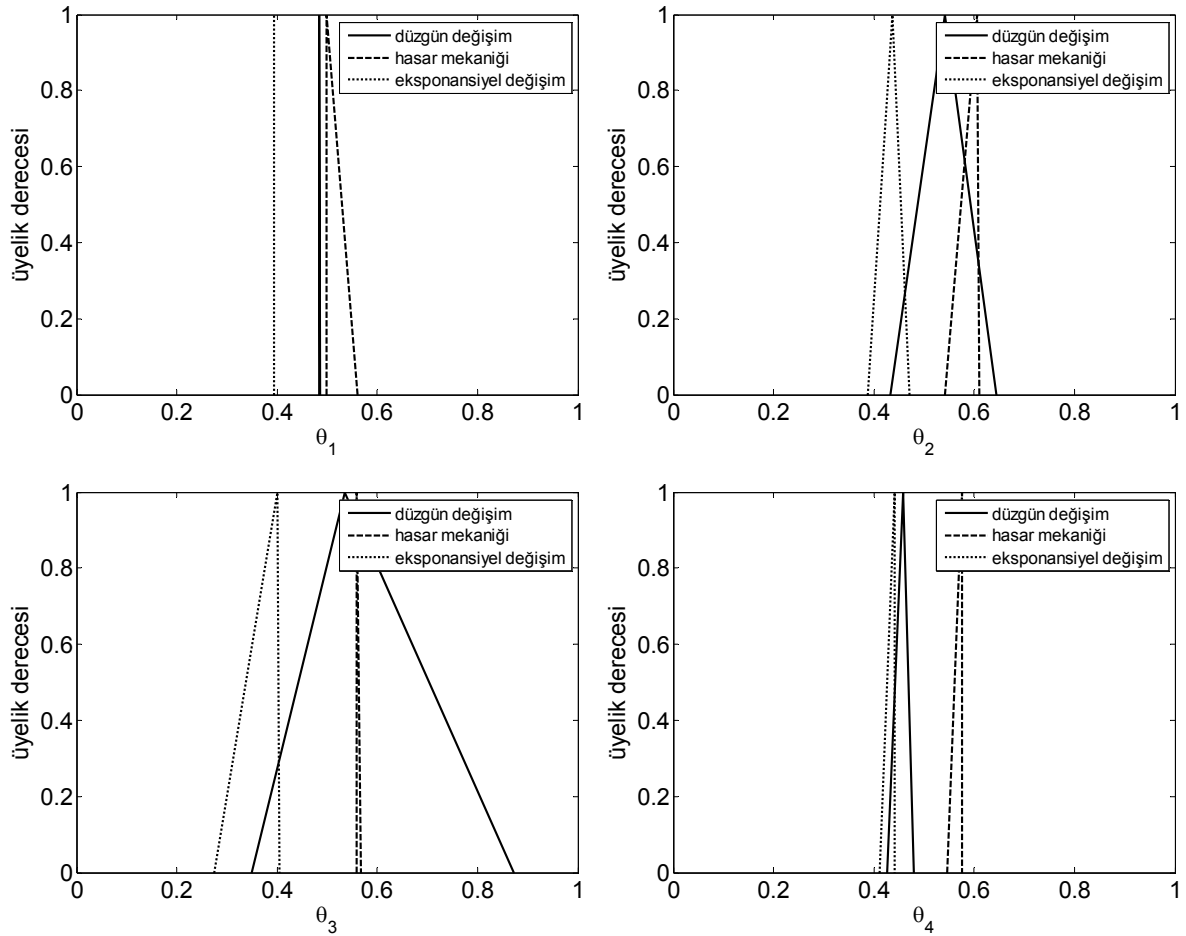


Őekil 7 0  $\alpha$ -seviyesinde aralık deęerleri a) dűzgűn deęiřim b) hasar mekanięi c) eksponansiyel deęiřim modeli

Őekil-8'de her űç hasar modeli iwin gűncellenen bulanık model parametreleri verilmiřtir. Eęilme rijitlięinin dűzgűn deęiřimi modelinde model parametreleri, hasarsız elemanın



rijitliğinin yüzde olarak azalması, diğer iki modelde ise çatlak boyunun kesit yüksekliğine oranı olarak seçilmiştir. Bundan dolayı bütün parametreler  $[0,1]$  aralığında değişmektedir. Şekil-8'den açıkça görüldüğü üzere düzgün değişim modeli ile yapılan güncelleme ile elde edilen bulanık model parametrelerinde belirsizlik daha fazladır. Özellikle ikinci ve üçüncü model parametreleri için bu durum daha belirgindir. Birinci ve dördüncü model parametresinde ise belirsizlik miktarı bütün modeller için çok düşüktür. Bunun nedeni birinci çatlak mesnet bölgesine yakın olması ve davranışa etkisinin diğer çatlaklara göre daha fazla olmasıdır. Serbest uca yakın çatlak için dördüncü parametrenin ise davranışa hassaslığı çok azdır. İki durumda da belirsizlikler düşük olmaktadır.



Şekil 8 Güncellenen bulanık model parametreleri

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapı sağlığı izleme verileri ile hasar tespiti probleminde çubuk elemanlar için kullanılabilinecek üç farklı çatlak modelinin performansı modellemede meydana getirdikleri hata açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında çok basit bir hasar modeli olan giriş rijitliğinin düzgün azalması modelinden elde edilen sonuçların daha kesin ve detaylı olan hasar mekaniği ve eksponansiyel değişim modelinden elde edilen sonuçlardan çok farklı olmadığı görülmüştür. Halihazırda mekanikte ters problem olarak bilinen sonlu eleman modeli güncellemesinin hesaplama yükü açısından pahalı bir yöntemdir. Bu nedenle, hasarın yeri ve şiddetinin değişmesi durumunda dahi düzgün değişim modelinde olduğu gibi rijitlik matrislerinin açık ifade edilmesi ek hesap yükünü ortadan kaldırmaktadır. Daha detaylı

modeller olmalarına rağmen hasar mekaniği ve eksponansiyel değişim modellerinde rijitlik matrisinin her hasar durumu için sayısal integrasyon ile hesaplanması dezavantaj oluşturmaktadır ve modellemedeki hata (belirsizlik) oranı düzgün değişim modeli ile ciddi farklılıklar göstermektedir. Bundan dolayı, çubuk elemanlarda hasar belirleme probleminde düzgün değişim modeli hesaplamadaki pratikliği açısından tercih edilebilir.

#### REFERANSLAR

- [1] Catbas, F.N., Kijewski-Correa, T. L., and Aktan, A.E., Editors, “Structural Identification of Constructed Systems: Approaches, Methods and Technologies for Effective Practice of St-Id.” ASCE, ISBN 978-0784411971, 2012.
- [2] Bakir, P.G., Reynders, E., and De Roeck, G. “Sensitivity-based finite element model updating using constrained optimization with a trust region algorithm.” *J. Sound Vib.*, 305, 211–225, 2007.
- [3] Mottershead, J. E., Michael, L. and Friswell, M.I. “The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial.” *Mech. Syst. Signal Process.*, 25(7), 2275–2296, 2011.
- [4] Meruane, V., and Heylen, W. “An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties.” *Mech. Syst. Signal Process.* 25, 1559–1573, 2011.
- [5] Goller, B., and Schueller, G.I. “Investigation of model uncertainties in Bayesian structural model updating.” *J. Sound Vib.*, 330, 6122–6136, 2011.
- [6] Fonseca, J. R., Friswell, M.I., Mottershead, J. E., and Lees, A.W. “Uncertainty identification by the maximum likelihood method.” *J. Sound Vib.*, 288, 587–599, 2005.
- [7] Hua, X., Ni, Y., Chen, Z., and Ko, J. “An improved perturbation method for stochastic finite element model updating.” *Int J Numer Methods Eng.* 73(13), 1845–1864, 2008.
- [8] Hanss, M. “Applied Fuzzy Arithmetic—An Introduction with Engineering Applications.” Springer, Berlin-2005.
- [9] Erdogan, Y. S. and Bakir, P. G. “Inverse propagation of uncertainties in finite element model updating problem through use of fuzzy arithmetic” *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 26(1) 357-367, 2013.
- [10] Haag, T., Herrmann, J. and Hanss, M. “Identification procedure for epistemic uncertainties using inverse fuzzy arithmetic” *Mech. Syst. Signal Process.* 24(7), 2021-2034, 2010.
- [11] Christides, S. and Barr, A.D.S., “One dimensional theory of cracked bernoulli-euler beams” *International Journal of Mechanical Science*, 26(11/12) 639–648, 1984.
- [12] Tada H, Paris P and Irwin G. “The stress analysis of cracks handbook. Hellertown” PA: Del Research Corp-1973.