TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK DEPREM SONRASI HASAR TESPİTİ: SON GELİŞMELER VE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR

B. Gunes[1], O. Gunes[2] ve H.İ. Andiç[3]

[1] *Yrd. Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Atılım Üniversitesi, Ankara*
[2] *Yrd. Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Çankaya Üniversitesi, Ankara*
[3] *İnşaat Müh, Mitek Ltd.*
Email: bgunes@atilim.edu.tr

ÖZET:

Yapıların deprem sonrası hasar durumlarının belirlenmesi uzman bir mühendis tarafından yapılacak detaylı bir değerlendirmeyi gerektirir. Bu tip incelemeler özellikle şiddetli bir deprem sonrasında oldukça uzun sürmekte, süreç uzadıkça da depremden kaynaklanan ekonomik ve sosyal zararlar artmaktadır. Bu sebeple deprem sonrası yapı tahkikinde kullanılacak hızlı ve güvenilir yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Titreşim bazlı değerlendirme yöntemleri bu amaç doğrultusunda yapıdan kaydedilen dinamik tepki verilerinin incelenmesi neticesinde yapının bütünlüğü hususunda durum tespitine, yerinde ve tahribatsız incelemeyle imkân sağlayan alternatif bir teknoloji olarak ilgi görmektedir. Özellikle çevresel titreşim tepki verilerinin bir deprem öncesi ve sonrasında yapıdan kolaylıkla elde edilmesi mümkün olduğundan, bu verileri kullanan hasar tespit teknikleri üzerinde çalışmalar son on beş yılda hız kazanmıştır. Bu amaçla literatürde önerilen modal temelli pek çok hasar indeksi bulunmasına rağmen, bu indekslerin deprem sonrası hasar tespiti için betonarme yapılara uygulanması ve bu indekslerin farklı hasar seviyelerindeki performanslarıyla ilgili neredeyse hiç deneysel çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada deprem hareketi öncesi ve sonrası çevresel titreşim verileri kullanılarak yapının hasar durumunu belirlemek amacıyla kullanılan yöntemler özetlenecek ve betonarme çerçeve yapılar için geliştirilmekte olan yöntem tanıtılacaktır. Bu amaçla tasarlanan deneysel çalışma, bir betonarme çerçevenin yük taşıma kapasitesine kadar aşamalı olarak yüklenmesini, bu şekilde çeşitli hasar seviyelerinin simule edilmesini öngörmektedir. Her hasar seviyesinde hem çevresel titreşime hem de darbe testine karşılık yapıdan toplanan ivme verileri ışığında yapının hasar durumunun saptanması hedeflenmektedir. Araştırmanın bir ön aşaması olarak betonarme çerçevenin hasar öncesi ve bir hasar senaryosu sonrası titreşim özellikleri nümerik bir çalışmayla karşılaştırılmalı olarak tespit edilmiş ve Hasar Saptayıcı Vektör (Damage locating vector, DLV) metoduyla hasar tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmalara dayanak teşkil edecek bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve ilgili değerlendirmeler sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER : Yapısal sağlık takibi, hasar tanımlama, betonarme çerçeve

1. GİRİŞ

Yapısal Sağlık Takibi (YST), hasar tanımlama metodolojilerinin geliştirilip bunların inşaat mühendisliği yapılarına uygulanması işlemlerini kapsayan bir süreçtir. Hasarın tanımlanması öncelikle hasarın varlığının tespiti, daha sonra yerinin saptanması ve son olarak da büyüklüğünün belirlenmesi aşamalarını içerir ve yapının kalan ömrünün tahmini ve bu sürenin uzatılması çalışmalarına dayanak teşkil eder. YST incelemeleri hem lokal hem de genel hasar tespit teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Lokal yöntemler, gözle kontrol ve tahribatsız inceleme tekniklerini kapsar. Ancak, bu yöntemlerin en önemli kısıtı, hasarlı bölgenin önceden tespitini ve incelenecek bu bölgenin erişilebilir olmasını gerektirmesidir. Titreşim verilerine dayalı genel hasar tespit yöntemleri bu sınırlamaya olarak geliştirilmiş ve son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır

(Farrar vd., 1994; Salawu, 1997; Doebling vd., 1998; Sohn vd., 2003; Chang vd., 2003; Farrar ve Worden, 2007).

Titreşim verileri kullanılarak geliştirilen YST, yapıdan periyodik olarak toplanan titreşim kayıtlarının incelenmesi, hasara hassas yapısal parametrenin bu kayıtların işlenmesi suretiyle çıkarılması ve yapının hasar durumunun belirlenmesi aşamalarını içermektedir. Titreşim verilerinin kullanıldığı tekniklerin dayandığı temel prensip yapının modal parametrelerinin (frekans, mod şekilleri ve modal sönümleme) kütle, rijitlik, enerji sönümleme mekanizmaları gibi fiziksel özelliklerine bağlı olması ve bu fiziksel özelliklerde meydana gelecek değişikliklerin modal parametreleri de değiştireceğidir. Bu geçerli bir kabul olmakla beraber, yapının dinamik karakteri sadece fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimlerden değil, ısı ve nem gibi diğer çevresel etkenlerdeki değişimlerden de etkilenebilmektedir. Yapısal hasar dışındaki sebeplerle dinamik özelliklerde meydana gelen farkların ölçümlerde gürültü olarak değerlendirilebilmesi ve titreşime dayalı hasar tespit tekniklerinin başarılı olabilmesi için hasardan kaynaklanan farkların ölçümlerdeki 'gürültü'den oldukça fazla olması gerekmektedir.

2. HASAR BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Mevcut hasar belirleme yöntemleri genel olarak modele-dayalı ve belirleyici niteliğe-dayalı yöntemler olarak iki gruba ayrılabilir. Modele-dayalı yöntemler esas itibariyle yapının matematik modelinin ya da yapının fiziksel parametrelerinin titreşim ölçümleri kullanılarak kalibre edildiği model-güncelleme yöntemleridir (Zimmerman ve Kaouk, 1992; Fritzen vd., 1998). Esas itibariyle bu yöntemlerde, tepki parametrelerinin fiziksel özelliklerdeki değişimlere bağlı olarak gösterdiği değişiklikler, modelleme kabullerini, elastik modülü ve model geometrisini güncellemekte kullanılır. Yapısal modelde seçilen bazı parametreler, titreşim verileri kullanılarak türetilen parametreler ile yapının fiziksel modeli kullanılarak elde edilen parametreler arasındaki farkı en aza indirgemek suretiyle güncellenir; bu esas itibariyle bir optimizasyon problemidir. Bu tip optimizasyon problemleri sıklıkla konveks-olmayan bir yapıdadırlar ve gerçek optimumu kaçırarak yanlış parametrik değerlere yakınsayabilirler. Ayrıca, bu yapıdaki ters problemler çoklukla kötü-şartlıdırlar ve veri üzerine uygulanan kısıtlamalar da genelde tek-çözüme ulaşmaya yeterli gelmez. Çözüm için kullanılan kısıtlı optimizasyon algoritmaları, matris pertürbasyon yöntemleri veya minimum norm-tipli çözümlerde de hasar çok sayıda parametre üzerine yayılır. Bu formülasyonlardan elde edilen fiziksel parametrelerin gerçek hasar senaryosuyla hiçbir ilgisi olmayabilir. Hasarın yeri ve biçimi gibi hususlarda muhakeme yaparak mühendislik bilgisini çözüme dahil etmek bu optimizasyon problemlerinin başarıya ulaşmasında büyük önem arz eder.

Belirleyici niteliğe-dayalı yöntemlerde ise yapısal değişiklikler, yapının analitik bir modeline ihtiyaç duyulmaksızın yapıdan alınan titreşim ölçümleri kullanılarak saptanır. Burada temel olan yapısal değişikliklere hassasiyet gösteren hasar belirleyici niteliği belirlemektir. İnşaat yapılarındaki hasarı saptamak için literatürde önerilen belirleyici niteliğe-dayalı yöntemler şu şekilde sıralanabilir (Doebling vd., 1996; Sohn vd., 2003; Randall vd., 2004a,b):

- Titreşim frekanslarına dayalı ölçütler
- Mod şekillerine dayalı ölçütler
- Yapısal sönümlemeye dayalı ölçütler
- Birim şekil değiştirme enerjisine dayalı ölçütler
- Esneklik matrisine dayalı ölçütler ve diğer matris pertürbasyon yöntemleri
- Örüntü tanıma, sinir ağları ve diğer istatistiksel yöntemler
- İleri zaman-değişkenli dönüşümlere dayalı doğrusal olmayan yöntemler
- Diğer yöntemler

3. TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK MODAL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Titreşim verileri kullanılarak doğrusal bir sistemi zaman uzayında tanımlamak için titreşim girdisinin bilindiği durumlarda kullanılan Gözlemci Kalman Filtresi ile Sistem Gerçekleştirme Algoritması (Eigensystem Realization Algorithm with Observer Kalman Filter, ERA-OKID), (Juang, 1994) literatürde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu algoritma ile sistem gerçekleştirilip titreşim girdileri (u) sistem çıktılarıyla (y) denklem 1'de görüldüğü şekilde sistem matrisleri (A, B, C, D) ile ilişkilendirilir:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{D}\boldsymbol{u} \end{aligned} \tag{1}$$

Ayrık zamanda elde edilen geçiş matrisi $\boldsymbol{A}$'nın, sürekli zamana geçirilip ardından özdeğer ($\boldsymbol{\Lambda}$) ve özyöneylerinin ($\boldsymbol{\Psi}$) elde edilmesiyle birlikte sistemin doğal titreşim frekansları (f^{ID}), enerji sönümleme oranları (ξ^{ID}) ve rastgele ölçeklendirilmiş mod şekilleri ($\boldsymbol{\varphi}$) bulunmuş olur:

$$\Lambda_i = \alpha_i \pm \beta_i \tag{2}$$

$$f_i^{ID} = \frac{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}}{2\pi} \tag{3}$$

$$\zeta_i = \frac{-\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda}^{-p} \tag{5}$$

Denklem (5)'te üstsimge olarak yer alan *p* değişkeni çıktı verilerinin (sensör ölçümlerinin) deplasman, hız veya ivme olmasına bağlı olarak sırasıyla 0,1 veya 2 olarak alınmalıdır. Daha sonraki inceleme aşamalarında denklem (5)'te verilen mod şekillerinin kütle ile normalize edilmiş şekillerine ihtiyaç duyulabilir. Sistem gerçekleştirilmesi esnasında elde edilen $\boldsymbol{B}$ matrisini kullanarak bu şekilde normalize edilmiş mod şekillerine ulaşmak mümkündür. (Gunes, 2002)

Titreşim girdisinin bilinmediği ama sistemin stokastik kabul edilebileceği durumlarda ise Altuzay Algoritması (Van Overschee ve Moor, 1996) kullanılabilir. Bu durumda sistem aşağıdaki denklem seti ile temsil edilir.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{w} \\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{v} \end{aligned} \tag{6}$$

Burada $\boldsymbol{w}$ ve $\boldsymbol{v}$ gürültü vektörleri, $\boldsymbol{A}$ ve $\boldsymbol{C}$ ise elde edilen sistem matrisleridir. Sistemin doğal titreşim frekansları, enerji sönümleme oranları ve rastgele ölçeklendirilmiş mod şekilleri yine (2-6) denklemleri kullanılarak bulunabilir. Burada üzerinde durulması gereken nokta, titreşim girdisinin bilinmediği ve $\boldsymbol{B}$ matrisi oluşturulamadığı bu stokastik sistem için hesaplanan mod şekillerinin daha sonra kütle normalize haline getirilmesi için bu matrisin kullanılması dışında bir yönteme başvurulması zorunluluğudur (Bernal, 2006).

4. HASARLI BÖLGENİN TESPİTİ

Yapıda hasarın mevcut olduğuna karar verildikten sonra, temel olarak hasardan ötürü esneklik matrisinde oluşan farkı esas alan 'Hasar Saptayıcı Vektör' (Damage Locating Vector - *DLV*) yöntemi, bu çalışmada hasarlı bölgeyi

tespit etmek üzere kullanılmıştır. Detaylı bilginin ilgili kaynaklardan (Bernal, 2002; Bernal ve Gunes, 2004) elde edilebileceği yöntem kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Yapıdan elde edilen dinamik tepki verileri vasıtasıyla esneklik matrisi sensör lokasyonlarında;

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{\Phi}_n \boldsymbol{\Omega}^{-1} \boldsymbol{\Phi}_n \tag{7}$$

formülasyonu ile elde edilir. Bu formülasyonda $\boldsymbol{\Phi_n}$ kütle ile normalize edilmiş mod-şekilleri matrisi ve $\boldsymbol{\Omega}$ bu şekillere karşılık gelen doğal titreşim frekanslarının karesini içeren diyagonal bir matristir. Hasar öncesi ve sonrası verileri ile (7) numaralı formülasyon kullanıldığında sırasıyla $\boldsymbol{F_U}$ ve $\boldsymbol{F_D}$ matrisleri elde edilir. Hasarsız ve hasarlı sistemler için birebir aynı deformasyonları yaratacak yük dağılımları olduğu kabulünden yola çıkarak tüm bu dağılımları $\boldsymbol{L}$ matrisinde toplarsak aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

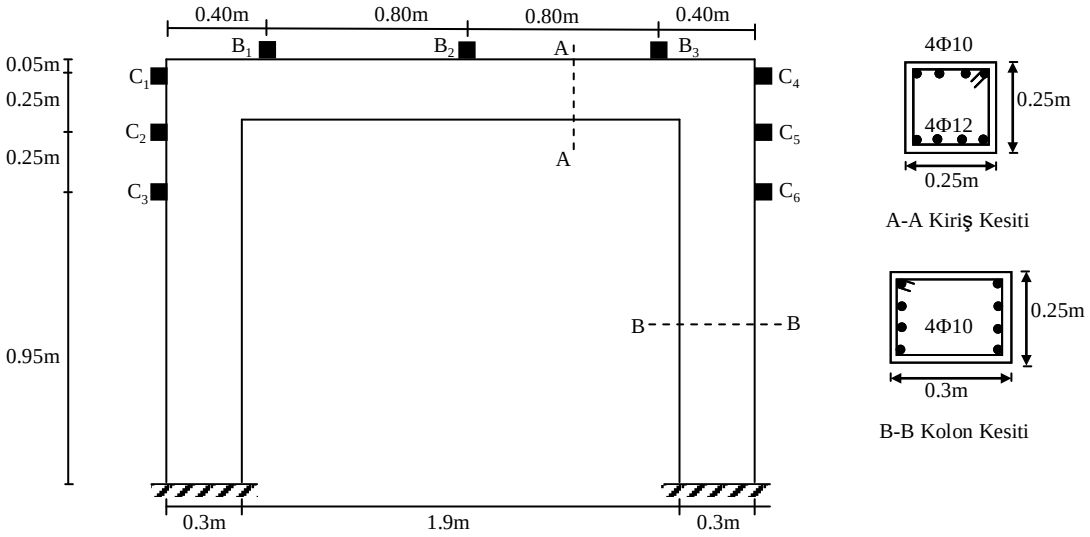
$$\left(\boldsymbol{F_D} - \boldsymbol{F_U}\right) \boldsymbol{L} = \boldsymbol{DF} \cdot \boldsymbol{L} = 0 \tag{8}$$

Sistemde hiçbir hasarın olmadığı, esneklik matrisi farkı, $\boldsymbol{DF}$=0 durumu hariç bu denklemin sağlanmasının tek koşulu, $\boldsymbol{L}$ matrisinin esneklik matrisleri farkından elde edilen $\boldsymbol{DF}$'nin hiçlik uzayında (null-space) yer alan tüm vektörleri içermesidir. Esneklik matrisi farkına Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition) uygularsak, *DLV* adını verdiğimiz yük dağılımlarını elde edebiliriz. Bu vektörlerin her birini yani her bir *DLV*'yi hasarsız yapının analitik modeline yük olarak uyguladığımızda, bu statik yüklemeye karşılık gelen deformasyonlar ve gerilmeler hesaplanır. Teorik olarak hasarlı bir elemanın üzerindeki gerilme sıfır olmak zorundadır (Bernal, 2002). Pratikte ise bu gerilme, gerek ölçümdeki gürültü gerek modelleme kabulleri sebebiyle sıfır değil tespit edilen bir eşikten daha düşük değerleri kapsar (Bernal ve Gunes, 2004).

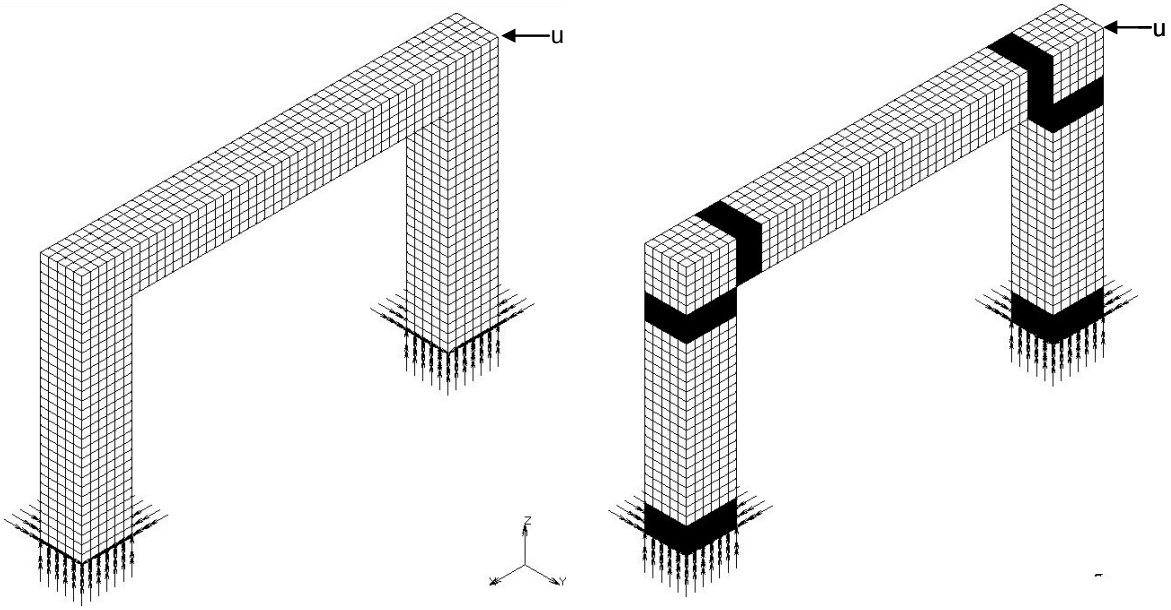
5. ÖRNEK ÇALIŞMA: TEK-KATLI TEK-AÇIKLIKLI BETONARME ÇERÇEVE

Özellikle ülkemizde yapı stoğunun büyük ölçüde betonarme çerçeve türü taşıyıcı sisteme sahip binalardan oluştuğu ve literatürde bu tip yapılar üzerinde yapılan çalışmaların son derece sınırlı sayıda olduğu göz önüne alınarak üzerinde titreşim testleri yapmak üzere Şekil 1'de gösterilen tek-katlı tek-açıklıklı bir betonarme çerçeve seçilmiştir. Kiriş ve kolon üzerindeki ivmeölçerler sırasıyla B ve C işaretleriyle gösterilmiştir. Deneysel çalışma öncesi davranışı anlamak üzere gerçekleştirilen nümerik simulasyonlarda aynı çerçeve bir sonlu eleman programı olan MARC / Mentat ile 3-boyutlu olarak Şekil 2a'da gösterildiği şekilde modellenmiştir. Şekil 2b'de hasarlı bölge koyu renkle işaretlenmek suretiyle gösterilmiş, bu bölgedeki betonun elastik modülü %25 ve %50 azaltılmak suretiyle, deprem sonrası durumu canlandırmak üzere iki farklı değerde hasar senaryosu simule edilmiştir.

Çerçeve modeli, hasar öncesi ve iki farklı değerde hasar senaryosu durumlarında Şekil 2'de gösterildiği şekilde titreşim girdisiyle (u) tahrik edilmiş ve yapıdan sensör noktalarında elde edilen ivme tepkimeleri toplanmıştır. Bu verilerin ERA-OKID algoritması ile işlenmesi suretiyle yapının modal özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen doğal titreşim frekansları ($\boldsymbol{f^{id}}$), modelden elde edilenlerle ($\boldsymbol{f^{model}}$) karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere özellikle ilk beş mod çok belirgin olarak tespit edilmiş, analitik hesaplanan ve titreşim verileri kullanılarak elde edilen frekanslar arasındaki fark %1 mertebesiyle sınırlı kalmış, daha yukarı modlar için ise bu fark en çok %7 mertebelesine ulaşmıştır. Bu modların tepkiye katkıları minimal olduğundan, bu modların belirlenmesinde gözlenen hata payındaki artış da beklenen bir sonuçtur.



Şekil 1. Betonarme çerçeve test düzeneği: Geometri ve ivmeölçer noktaları



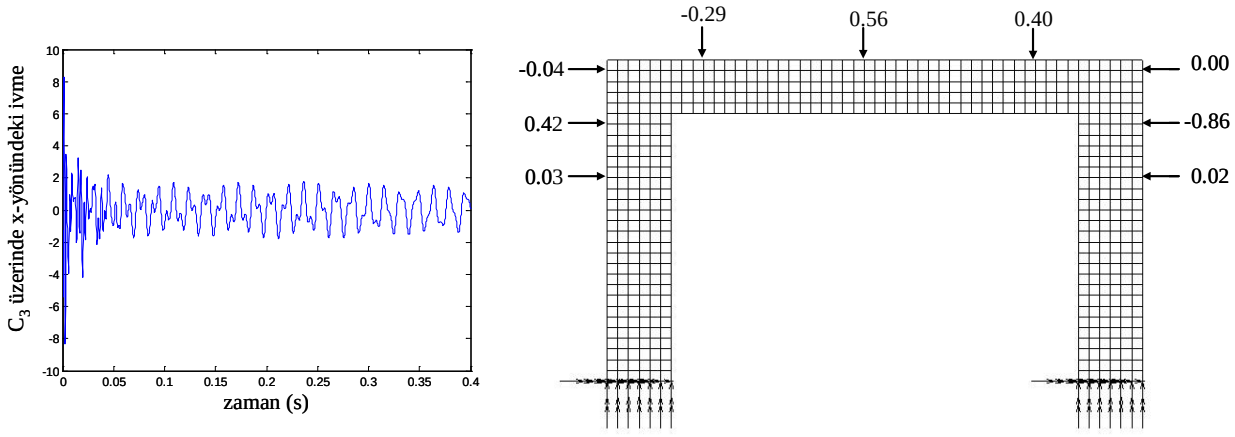
(a) (b)

Şekil 2. Çerçevenin 3-boyutlu MARC\Mentat modeli: (a) Hasar öncesi, (b) Hasar sonrası

Tablo 1. Sonlu eleman modelinden hesaplanan ve titreşim verileri kullanılarak elde edilen frekanslarının karşılaştırması

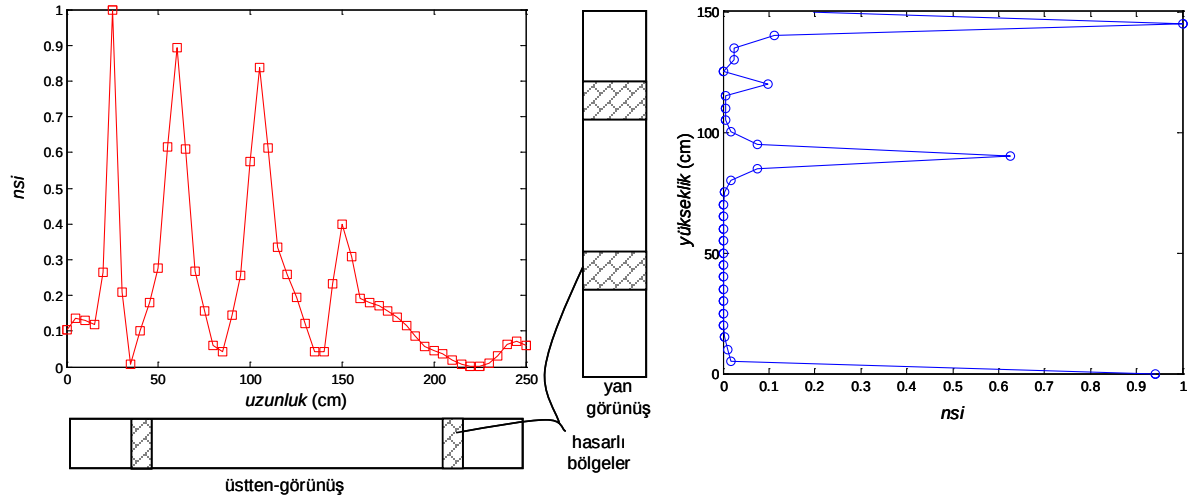
Mod	*Hasarsız*			*%25 Hasar*			*%50 Hasar*		
	f^{model} (Hz)	f^{id} (Hz)	*%Fark*	f^{model} (Hz)	f^{id} (Hz)	*%Fark*	f^{model} (Hz)	f^{id} (Hz)	*%Fark*
1	34.9	34.9	0.0	33.4	33.3	0.1	30.9	30.9	0.1
2	62.8	62.6	0.4	59.3	59.1	0.3	54.2	54.1	0.2
3	64.4	64.3	0.1	61.3	61.2	0.2	56.5	56.4	0.1
4	138.6	136.8	1.3	133.7	132.1	1.2	127.0	125.6	1.1
5	142.9	141.0	1.4	140.0	138.2	1.3	135.4	133.7	1.3
6	292.4	281.4	3.8	280.0	273.0	2.5	262.0	260.0	0.8
7	297.5	298.3	0.3	287.8	290.7	1.0	272.9	278.9	2.2
8	316.6	338.0	6.7	307.6	324.1	5.4	293.6	303.6	3.4
9	364.5	354.2	2.8	347.8	346.0	0.5	323.7	333.0	2.9
10	380.2	410.1	7.9	370.4	395.7	6.8	354.9	377.2	6.3

Frekanslarda gözlenen fark ile hasarın varlığı tespit edildikten sonra, sıra *DLV* yöntemi ile hasarlı bölgenin belirlenmesi aşamasına gelmiştir. Bunun için yapıdan elde edilen titreşim verileri (Şekil 3a) kullanılarak sistemin hasar öncesi (F_U) ve sonrası (F_D) esneklik matrisleri ivmeölçer lokasyonlarında elde edilmiştir. Fark matris *DF*'e tekil değer ayrışımı (SVD) uygulanarak hasar belirleyici vektör (*DLV*) bulunmuştur. Şekil 3b'de gösterilen bu vektörün yapı modeline statik yük olarak uygulanması ile yapı üzerindeki gerilmeler hesaplanmış, bu gerilmelerin normalize edilmesi suretiyle *nsi* olarak tanımlanan indeks oluşturulmuştur. Bu çalışmadaki yapının moment taşıyıcı bir çerçeve olması sebebiyle belirleyici gerilmeler olarak eğilme gerilmeleri kullanılmış ve %50 hasar senaryosu için *nsi* değerleri kiriş ve kolon boyunca Şekil 4'de gösterildiği şekilde elde edilmiştir. Bu indeksin işaret ettiği, pratik olarak belirli bir eşiğin altında kaldığı bölgelerin potansiyel olarak hasarlı olabileceği ve buralarda detaylı bölgesel incelemeler yapılması gerektiği sonucuna varılabilir. Buna göre, *nsi*<0.2 eşiği hasarlı bölgenin tespiti için kullanılacak ölçüt olarak seçilirse, hem kolon hem de kiriş üzerindeki geçek hasarlı bölgelerin *bu eşiğin* altında kaldığı ve DLV yönteminin işaret ettiği potansiyel olarak sorunlu bölgelerin hasarlı kısmı da barındırdığını söylemek mümkündür.



(a) (b)

Şekil 3. (a) Kolon üzerinde C_3 noktasında kaydedilen örnek ivme çıktısı (b) Model üzerinde sensör noktalarına statik yük olarak uygulan *DLV*



(a) (b)

Şekil 4. Çerçeve üzerindeki hasarlı bölgenin DLV yöntemi ile tespiti:
(a) kiriş boyunca (b) kolon boyunca elde edilen *nsi* değerleri

6. SONUÇ

Türkiye gibi yapı stoğunun oldukça büyük bir kesimi deprem kuşağında yeralan betonarme binalardan oluşan bir ülke için deprem sonrası yapı tahkikinde kullanılacak hızlı ve güvenilir yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Titreşim verilerine dayalı değerlendirme yöntemleri bu amaç doğrultusunda önerilmiş, yapıdan kaydedilen dinamik tepki verilerinin incelenmesi neticesinde yapının hasar tespitine, yerinde ve tahribatsız incelemeyle imkân sağlayan bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemlerin pratik olarak inşaat mühendisliği yapılarına uygulanabilmesine imkân sağlayacak algoritmaların başarılı olması halinde öncelikli olarak 'stratejik' yapıların bütünlük ve güvenlik açısından gerek normal işlevsel kullanım esnasında gerekse deprem gibi bir doğal afeti takiben, anında ve masrafsız olarak değerlendirilmesi sağlanmış olacaktır. Ayrıca tarihi eserler gibi değerleri ekonomik olarak kolayca ölçülemeyen yapıların yapısal olarak değerlendirilmesi ve gerekli güçlendirme tedbirlerinin alınması hususunda sağlayabileceği yararlar göz ardı edilemez.
Bu makalede sunulan simülasyona dayalı hasar tespit çalışmaları deneysel çalışmalarla incelenecek çerçeve yapısının hasar öncesi ve sonrası dinamik özelliklerinin belirlenmesinde başarı olasılığının yüksek olduğunu, ancak hasar lokalizasyonu ve büyüklüğünün tahmini konusunda zorluklarla karşılaşılabileceğini göstermektedir. Ek simülasyon çalışmaları ve sonrasında yapılacak deneysel çalışmalarla optimum ölçüm parametreleri ve hasar tespit yöntemleriyle hasar bölgeleri ve büyüklüğünün daha doğru tahmini için çalışmalar yapılacaktır.

KAYNAKLAR

Bernal, D. (2002). Load vectors for damage localization. *Journal of Engineering Mechanics* **128:1**, 7–14.

Bernal, D. ve Gunes, B (2004). A flexibility based approach for the localization and quantification of damage: A benchmark application. *Journal of Engineering Mechanics* **130:1**, 61-70.

Bernal, D. (2006). Flexibility-based damage localization from stochastic realization results, *Journal of Engineering Mechanics* **132:6**, 651-658.

Chang, P.C., Flatau, A. ve Liu, S.C. (2003). Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring* **2:3**, 257-267.

Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. ve Shevitz, D.W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Technical Report LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Doebling S.W., Farrar C.R. ve Prime M.B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and Vibration Digest* **30:2**, 91-105.

Farrar, C.R., Baker, W.E., Bell, T.M., Cone, K.M., Darling, T.W., Duffey, T.A., Eklund, A. ve Miglori, A. (1994). Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande. Los Alamos National Laboratory Report LA-12767-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Farrar, C.R. ve Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **365:1851**, 303-315.

Gunes, B (2002). Identification and Localization of Damage. Ph.D. Thesis, Civil and Environmental Eng. Dept., Northeastern University, Boston, MA.

Juang, J. (1994). Applied System Identification, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Randall, B.R. (2004a). State of the art in monitoring rotating machinery—part 1. *Sound and Vibration Magazine*, March 2004, 14–21.

Randall, B. R. 2004b State of the art in monitoring rotating machinery—part 2. *Sound and Vibration Magazine*, May 2004, 10–17.

Salawu, O.S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*. 19:9, 718–723.

Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., ve Nadler BR (2003). A review of structural health monitoring literature: 1996-2001, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Vanoverschee, P. ve Moor, B.L.R. (1996). Subspace Identification for Linear Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston.